INVESTIGACION y CIENCIA

LUCES Y SOMBRAS DE LA ASTRONOMIA COLOMBINA

LA EDAD DE ORO DE LA EVOLUCION ANIMAL

LIMITACIONES DEL SOPORTE LOGICO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



¿MAQUINAS HERRAMIENTAS PARA HORMIGAS?

ENERO 1993
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

INVESTIGACION y CIENCIA

Enero de 1993 Número 196



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Emilia Calvo Labarta: *La astronomía en el tiempo de Colón*; Ramón Pascual: *Velocidad de expansión y tamaño del universo*; Luis Bou: *Limitaciones del soporte lógico*, *Representación visual de biomoléculas* y *Juegos matemáticos*; J.-D. Ros: *La edad de oro de la evolucion animal*; José M. García de la Mora: *Origen de las lenguas americanas autóctonas*; Joan Bausells: *Las micromáquinas;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*

Ciencia y sociedad:

Francesc Pedró, J. P. Adrados, J.-D. Ros, Esteban Santiago y Eduardo Lorenzo Martín

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Domingo Fletcher, Laureano Carbonell y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Centro Inv. Nuclear de Karlsruhe.

Página	Fuente
7	*Jean de Dinteville y Georges de Selve* ("*The Ambassadors*"), de Hans Holbein, reproducido con permiso de Trustees, National Gallery, Londres
8	*Nuremberg Chronicle*: cortesía de Owen Gingerich
9	*Bola de Fuego*, de Albrecht Dürer, con permiso del Museo Fitzwilliam de Cambridge
10	Jana Brenning
12-13	Jim Riffle
14	Wendy L. Freedman
15	Kathleen Katimes/JSD
16-17	Jared Schneidman
18	Cortesía de la Universidad de Harvard
20-21	D. Aubert/Sygma
25	Nuclear Electric
38-39	Arthur J. Olson y David S. Goodsell
40-41	Richard E. Dickerson (*izquierda*), Teresa Larsen (*centro*), Arthur J. Olson y David S. Goodsell (*derecha*)
42	Arthur J. Olson
43	Arthur J. Olson (*arriba, izda.*), Elizabeth D. Getzoff y John A. Tainer, Scripps Clinic (*arriba, centro*), Michael Pique, Scripps Clinic, y David S. Goodsell (*arriba, dcha.*), Arthur J. Olson y David Goodsell (*abajo, izda. y centro*), Arthur J. Olson y I. Siara Mian, Scripps Clinic (*abajo, derecha*)
45-48	Patricia J. Wynne
49	Johnny Johnson (*gráfico*), Patricia J. Wynne (*dibujos*)
50	Patricia J. Wynne
51	John A. Endler, Universidad de California en Santa Bárbara
59	Michael Goodman (*izquierda*), Sociedad de Historia de Arizona (*centro*), N. W. Tera/Photo Researchers, Inc. (*derecha*)
63-69	Silvia Nuere, R. Serrano y J. M. Villalba
70-71	Univ. Case Western Reserve
72-73	Gabor Kiss (*arriba*), Stephanie Rausser (*abajo, izda.*), Univ. de California en Berkeley (*centro y abajo a la derecha*)
74-75	Gabor Kiss-Universidad de Wisconsin (*arriba*), Univ. de Wisconsin (*abajo, izda.*), Neil McDonald (*abajo, dcha.*)
78	Robert Prochnow
79	Universidad de Tokyo (*izda.*), Univ. de Cornell e Instituto Nacional de Nanofabricación
87-91	*Pour la Science*



LA PORTADA muestra una hormiga con una rueda dentada de níquel para micromáquina en su pata. La imagen, realizada con un microscopio electrónico de barrido, se obtuvo en el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe. La rueda dentada, de 260 micrometros de diámetro y 150 de altura, se fabricó mediante el proceso LIGA, técnica que emplea litografía, electrodeposición y moldeado para construir piezas mecánicas microscópicas (véase "Las micromáquinas", por Gary Stix, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid - Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Buenos Aires, 52, 1.º 3.ª
08036 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

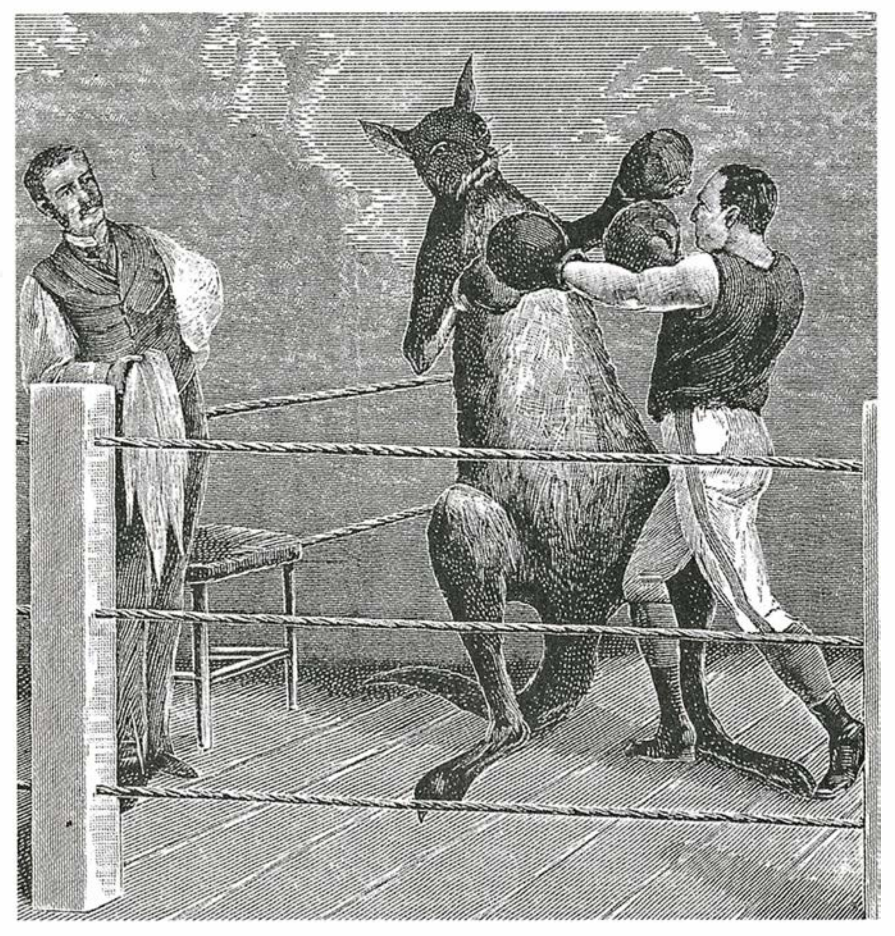
SCIENTIFIC AMERICAN: «En el pasado, cuando un submarino enemigo se posaba sin hacer ruido en el fondo del mar para eludir la detección, costaba más echarle el guante. En el conflicto presente, las leyes de la reflexión del sonido bajo el agua, hace ya tiempo aprovechadas en los barcos mercantes y de guerra de gran tonelaje para sacar un registro gráfico del relieve oceánico, se están adaptando para descubrir la presencia de submarinos que en silencio pretendan hacerse el muerto bajo las olas. La medida exacta en que se estén utilizando instrumentos de ecosondeo y sus fundamentos científicos y técnicos se cuentan entre los temas de los que no se puede hablar en público, por ser secreto de estado.»

«Las necesidades de caroteno (provitamina A), ácido ascórbico (vitamina C) y hierro pueden satisfacerse ingiriendo cantidades moderadas de hierba seca. En el caso del calcio y los factores complejos de vitamina B, hay que tomar entre 115 y 170 gramos, dosis que sólo soportarían los entusiastas. Sin duda, el consejo más sano y prudente sea emplear hierba seca, en todo caso en pequeñas cantidades y finamente molida, que se añada a un alimento común (el pan) o se aporte a modo de suplemento dietético en forma de tabletas, las cuales deben recetarse sólo bajo prescripción médica.»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Para prender este artificio no hay que ser pirotécnico. Provéase Ud de un soplete o incluso de una pipa de fumar de arcilla. Tome unas pocas hojas de papel de estaño, como las que se usan para envolver chocolate, y córtelas en tiras de dos o tres centímetros de ancho. Presente entonces cada una a la llama del soplete y verá que el metal inflama y cae en glóbulos incandescentes, que rebotan y corren un buen trecho por la mesa. Cuando la llama es intensa y el papel de estaño arde vivamente, los glóbulos son abundantes y ofrecen entonces el aspecto de un castillo de fuegos artificiales en miniatura. Merced a esta combinación de un metal con el oxígeno del aire, el papel de estaño se convierte en un óxido blanco. Fue así, estudiando el aumento de peso que muestra el estaño cuando se calienta en contacto con el aire, como John Rey, químico del siglo XVII, consiguió explicar la fijación del aire en los metales. –La Nature.»

«Es curiosa la manera en que los canguros salvajes practican el boxeo en su medio natural. Con suavidad, casi amorosamente, colocan las patas delanteras sobre los hombros de su adversario y luego le propinan un golpe en el vientre con un movimiento brusco y enérgico de una de sus patas traseras. El canguro del Royal Aquarium que presentamos en la ilustración ha sido educado para que no practique de forma tan ingeniosa el noble arte de la autodefensa. El hábil instructor del ingenioso marsupial lo ha entrenado para que pelee ateniéndose a las reglas del Marqués de Queensbury.»



Canguro boxeador profesional

La astronomía en el tiempo de Colón

Ayudado por su concepción del meridiano terrestre, completamente errónea, Colón volvió a dibujar el globo, animando así, quizás, a que otros realinearan los cielos

Owen Gingerich

En 1492 ocurrieron dos hechos de interés astronómico: la explosión de una brillante bola de fuego sobre Europa central, que dejó caer su meteorito rocoso cerca de la ciudad alsaciana de Ensisheim, y el descubrimiento por Colón del Nuevo Mundo.

Alberto Durero, joven e impresionable, vio la bola ardiente de camino hacia Italia. Y pintó el magnífico fenómeno en una tabla, aprovechando la otra cara de la plancha para un óleo de San Jerónimo. La representación del fenómeno celeste permaneció oculta a la vista durante varios siglos, hasta que hace un par de decenios pudo contemplarse cuando el museo Fitzwilliam de Cambridge recibió prestada la pintura del santo. Mientras tanto, el meteorito de Ensisheim, que se había conservado en la iglesia parroquial y luego en el Hôtel de Ville en Ensisheim, yacía en el olvido casi absoluto, hasta que los cosmoquímicos empezaron, hará varios años, a interesarse por la piedra de Ensisheim, el meteorito más antiguo datado con precisión en Europa.

Por extraño que parezca, lo que se diría el acontecimiento no astronómico de 1492 —la travesía atlántica de Colón— puede muy bien haber ejercido un efecto poderoso en el pensamiento astronómico. Aun cuando andaba equivocado en su idea de que podría navegar, rumbo oeste, hasta China y Japón, su empresa colonizadora y los viajes que siguieron demostraron con nitidez que la ciencia de la antigüedad —en particular el conocimiento geográfico— era lamentablemente incompleto. La revolución geográfica del Nuevo Mundo preparó el terreno para ideas astronómicas heterodoxas, incluida la posibilidad de una cosmología radicalmente distinta, con el Sol en el centro.

OWEN GINGERICH, astrónomo del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsonian en Cambridge, preside el departamento de historia de la ciencia de la Universidad de Harvard. Ha recorrido Europa y América en busca de ejemplares del *De Revolutionibus* de Copérnico, e inspeccionado más de medio millar del siglo XVI por si hallaba anotaciones de primera hora.

¿En qué situación se hallaba la astronomía por los años de la aventura de Colón? En *Los Embajadores* de Hans Holbein encontramos un excelente punto de apoyo para abordar la respuesta. Pintado el cuadro en 1533, constituye uno de los grandes tesoros de la Pinacoteca Nacional londinense ("National Gallery"). Entre el embajador de la corte francesa y su amigo el obispo de Lavaur, hay una mesa llena de libros e instrumentos. A primera vista, los ingenios se distribuyen bien entre los cielos, la tierra y el mar, representados, respectivamente, por los instrumentos astronómicos y el globo celeste en la parte superior, los libros terrenales y el laúd en el anaquel, y lo que parece un pez junto al suelo.

La verdad es que los objetos configuran una alegoría de las cuatro disciplinas que integran el currículum universitario: astronomía, aritmética, música y geometría. Los instrumentos remiten a la astronomía. La obra de Pedro Apiano, *Eyn newe unnd wolgegründte underweysung aller Kauffmanss Rechnung* de 1527, abierta en el anaquel, simboliza la aritmética. El laúd y un libro de himnos abierto por el luterano *Kom Heiliger Geyst* significa la música. La geometría está ejemplificada no sólo por las sugestivas perspectivas del mosaico del suelo (un mosaico italiano en el sepulcro de Eduardo el Confesor en la Abadía de Westminster, único en Inglaterra) y el laúd —un ejercicio de dibujo, favorito entre los artistas del Renacimiento—, sino también por el curioso objeto en forma de pez que flota sobre el suelo. Una inspección más ceñida, desde un punto aventajado que escorce esta imagen, nos ofrece una representación alargada, anamórfica, de una calavera humana, quizás un juego de palabras con el nombre del artista (Holbein, "hueso hueco").

La calavera, símbolo de mortalidad, introduce un nuevo plano en la metáfora renacentista, recordándonos que esta búsqueda del conocimiento terrenal es transitoria y efímera. El tema se refuerza con la cuerda rota del laúd, signo tradicional de muerte y decadencia. En contraste con los estudios del *quadrivium*, de palmaria manifestación, están los misterios eternos, simbolizados por el crucifijo medio oculto detrás de la cortina, en la esquina superior izquierda de la pintura. Los intereses del saber pueden convertirse en el centro de atención, pero las verdades permanentes yacen ocultas tras los poderes mortales.

En la era de *Los Embajadores* persistía la creencia en una edad de oro, desaparecida tiempo atrás, que guardaría la llave del universo; era un tiempo, asimismo, en que la novedad no constituía una virtud reconocida. A pesar de todo, la astronomía formaba parte importante del currículum, porque describía el escenario físico donde se desarrollaba la acción del hombre.

La Tierra —una esfera compuesta de tierra, agua, aire y fuego— estaba sólidamente radicada en el centro del cosmos. La rodeaban las esferas de los siete planetas (incluidos la Luna y el Sol) y una octava, donde residían las estrellas fijas (fijas unas con respecto a otras, si bien giraban, a velocidad rapidísima, una vez cada 24 horas). Allende lo cual moraba Dios Padre, con los ángeles y elegi-

dos en un estado de eterna felicidad. Un grabado de la *Crónica de Nuremberg*, libro lujoso de 1493, muestra la cosmología clásica en todo su esplendor.

La *Crónica de Nuremberg* se ilustró antes de que Europa hubiera oído hablar de Colón. Basta echarle una ojeada para arruinar uno de los mitos más extendidos sobre el viaje del navegante italiano. Desde los antiguos griegos, todo el mundo sabía que la Tierra era redonda. Aristóteles pensaba que la Tierra tenía que ser un globo porque, si se dejaban caer hacia el centro del universo pedazos de materia terrestre, tenderían naturalmente a apilarse en esfera. Y a modo de coda añadía que la sombra de la Tierra sobre la Luna en el momento de un eclipse lunar demostraba la corrección de su idea arquetípica.

Ello no empece, sin embargo, que cada 12 de octubre torne a repetirse la misma cantinela: cómo Colón hubo de convencer a Isabel y Fernando de la redondez del mundo. ¿Lo había olvidado la Cristiandad? Fueron, por contra, los norteamericanos de comienzos del siglo XIX quienes lo ignoraron. Pretendían así olvidar la explicación tradicional británica de que uno de los suyos, Sebastian Cabot, fue el primero en pisar tierra en Norteamérica: Colón había hallado sólo algunos islotes de las Indias.

En la resaca de su Revolución, los norteamericanos necesitaban desesperadamente algún héroe no británico. Colón cumplía los requisitos. No se sabía gran cosa de su figura, hasta que Washington Irving viajó a España, descubrió un rico filón de materiales originales y escribió una biografía muy leída. Por desgracia, el novelista mezcló la ficción con la realidad; una de sus escenas más gráficas, situada en Salamanca, desbordaba imaginación.

En ella, Colón hacía frente a una tribuna de clérigos, "una imponente hilera de maestros, frailes y dignatarios eclesiásticos" que "venían predispuestos contra él, pues los hombres de posición y dignidad tienden a estar en contra de los solicitantes pobres". Ridiculizaron la idea de la esfericidad de la Tierra y apelaron a las Escrituras para aseverar su carácter plano. Colón, hombre profunda-

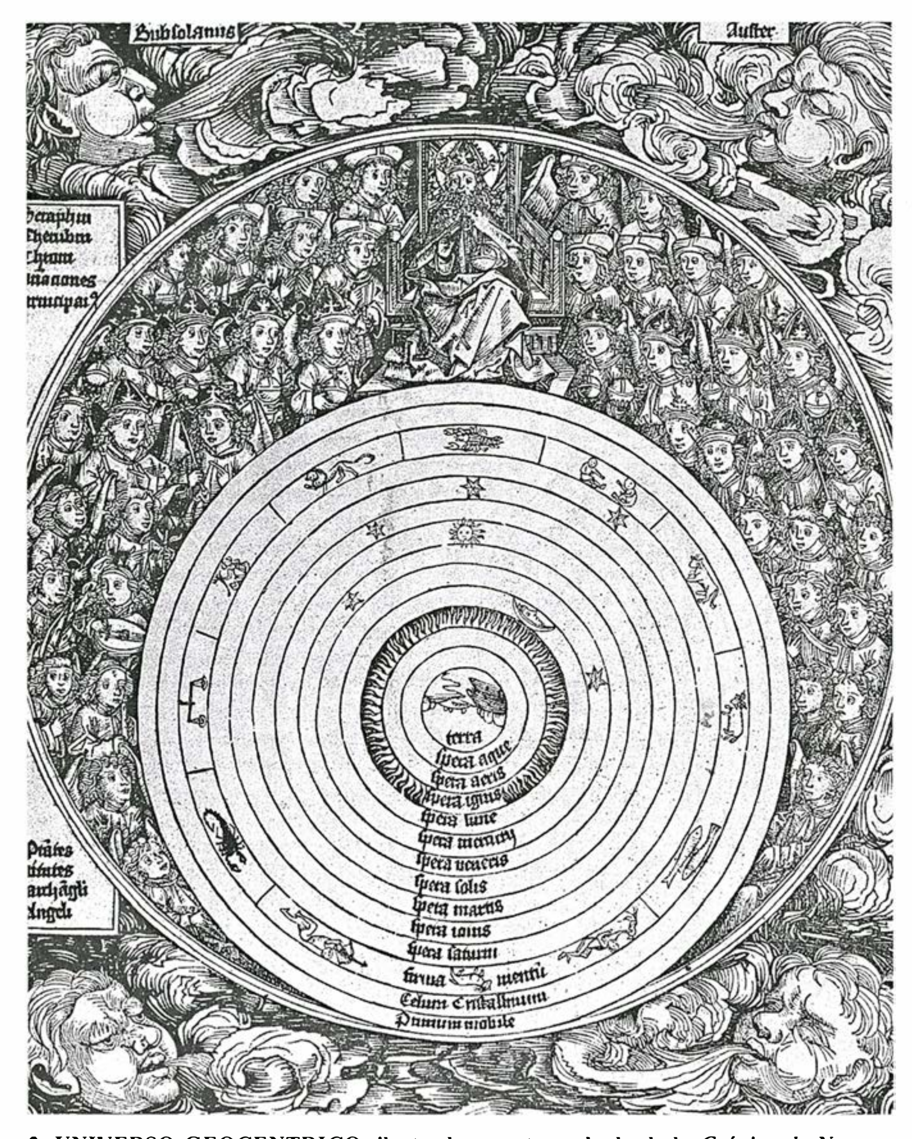


1. EN EL CUADRO *Los Embajadores*, de Holbein, aparecen representadas las materias que integraban el currículum universitario en 1533: aritmética, astronomía, geometría y música. Un globo muestra partes del Nuevo Mundo.

mente religioso, se sintió en peligro de ser declarado culpable, no sólo de error, sino también de herejía.

La verdad es muy otra. El conocimiento de la forma redonda de la Tierra perteneció siempre al legado del saber occidental. Cuando se desvaneció la Edad Oscura y se recuperaron las obras de Aristóteles, la noción de una Tierra esférica entró en el currículum de las universidades, recién creadas. La *Sphaera* de Sacrobosco, escrita en el siglo XIII y todavía hoy el manual astronómico más editado, daba un argumento simple para la forma esférica de la Tierra en dirección norte-sur: los viajeros encontraron que la Osa Mayor y la Estrella Polar subían más alto en el cielo a medida que avanzaban hacia el norte. En cuanto a la dirección este-oeste, Sacrobosco daba un argumento diferente, mucho más sutil: cierto eclipse de la Luna se produciría en determinado momento, único, con independencia de dónde se encontrara el observador; ahora bien, desde diferentes longitudes, la altura de la Luna en el cielo variaría de una manera compatible con una geografía esférica.

El problema al que se enfrentó Colón en Salamanca no era el de convencer a Isabel y Fernando de la redondez de la Tierra, sino de la racionalidad (y no temeridad) del viaje, en dirección oeste, hacia Catay y las Indias, habida cuenta de la extensa superficie continental euroasiática que mediaba. El diámetro de la Tierra había sido deducido con bastante exactitud por Eratóstenes en Alejandría; su valor redondeado de 252.000 estadios equivale a un meridiano de algo menos de 40.000 kilómetros, si aceptamos, con J. L. E. Dreyer, que un estadio equivale a 157,5 metros. Los especialistas en geodesia islámicos reelaboraron las medidas de Eratóstenes; al-Fargani, que trabajó en el círculo de Bagdad bajo el califa al-Ma'mun a comienzos del siglo IX, había cifrado esa longitud en 20.400 millas árabes (40.253 kilómetros, muy cercana a su valor moderno de 40.075). Colón supuso, incorrectamente, que las millas árabes eran las mismas que las romanas, lo que le dio un meridiano terrestre de 30.044 kilómetros, sólo tres cuartos de la distancia real.



2. UNIVERSO GEOCENTRICO, ilustrado en este grabado de la *Crónica de Nuremberg*, una historia del mundo publicada en 1493. La Tierra, redonda, yace fija en el centro, rodeada por los planetas, Luna y Sol incluidos, y por la esfera de las estrellas fijas. En el círculo más externo están representados Dios y los coros angélicos más los elegidos. Los cuatro vientos decoran las esquinas de la página.

Colón exageró significativamente la longitud terrestre de China y, por tanto, su lejanía de Europa. Estimó que la distancia en dirección este hasta el Japón era de 283 grados, acortando la distancia en dirección oeste, desde las Canarias, a menos de 5000 kilómetros. Dos cálculos erróneos que le servían para conferir racionalidad a su atrevido objetivo: navegar a las Indias en dirección oeste.

Cuando la corte se reunió en Salamanca en torno a la Navidad de 1486, los expertos allí congregados rechazaron la baja estimación colombina del tamaño de la Tierra. El meridiano terrestre que ellos defendían estaba próximo a lo que hoy se considera correcto. Sin sus cálculos equivocados, Colón no hubiera podido justificar su audaz expedición. El mito de los doctos defensores de una Tierra plana es "puro cuento"; como señaló el eminente biógrafo Samuel Eliot Morison: "Washington Irving, adivinando su eficacia en una escena pintoresca y conmovedora, tomó una relación ficticia de ese inexistente consejo de Universidad, publicada 130 años después del acontecimiento, la elaboró, y dio rienda suelta a su imaginación." El relato de Irving es un drama emocionante, "porque a todos nos gusta oír hablar de profesores y expertos confundidos por el sentido común. Pero toda esa historia es un disparate malicioso y embaucador".

En efecto, excepto por su geodesia, completamente errónea, Cristóbal Colón tenía poco que ver con la astronomía. En ocasiones se le ha representado rodeado de estrellas y primitivos instrumentos de navegación, como el nocturlabio —un instrumento para obtener la hora nocturna a partir de la posición de la Osa Mayor—; ahora bien, la escasez de pruebas de que el navegante se sirviera de las estrellas abona la idea de que pudo llegar a buenos resul-

tados por meras conjeturas. Confundido por los cielos tropicales y la ausencia de constelaciones circumpolares familiares, en dos ocasiones tomó equivocadamente la estrella *Beta* de Cefeo por la Polar, obteniendo una latitud 21 grados demasiado al norte. Tal como el almirante Morison destacaba, Colón no era ningún navegante celestial, sino un calculador infernal.

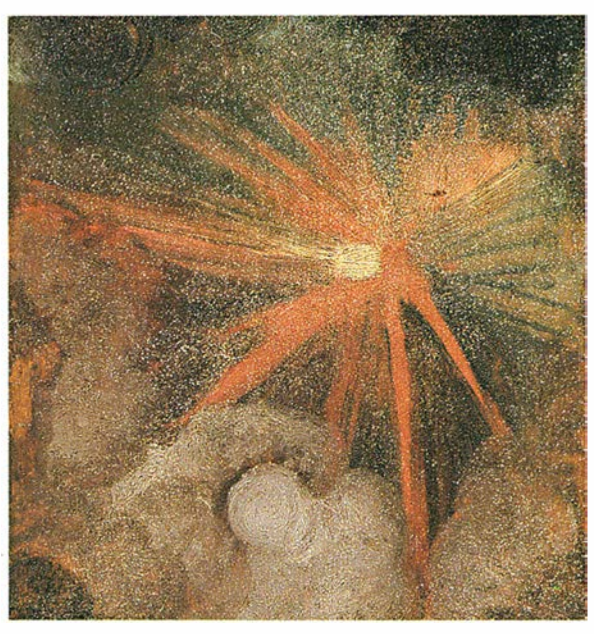
La excepción singular, y legendaria, de unas inclinaciones poco astronómicas la tenemos en el uso que hizo de las *Efemérides* de Johann Müller ("Regiomontano"), para predecir un inminente eclipse lunar. En su cuarto viaje, Colón varó en Jamaica, con los barcos carcomidos, inservibles para la navegación. Un pelotón se dirigió, en canoa, hacia el este, para solicitar ayuda de La Española y su capital, Santo Domingo (la actual República Dominicana). No le atraía demasiado al gobernador de la isla rescatar a Colón. Tenía miedo de perder tan pingüe sinecura, y así se tomó con calma el envío de refuerzos.

Pasaron los meses. La mitad de la tripulación de Colón se amotinó y aprestó canoas para llegar hasta La Española. Los indios jamaicanos, hartos de abalorios y otras chucherías producto de trueques, se volvieron cada vez más reacios a proporcionar comida a la disminuida, pero no por ello menos hambrienta, marinería.

De acuerdo con las *Efemérides*, la Luna experimentaría un eclipse en la noche del 29 de febrero de 1504. Colón se aseguró de que los indios supieran que la Luna se alzaría oscura y ensangrentada, como un signo de que Dios estaba enojado con ellos. El navegante se ocultó hasta que terminó el eclipse. Salió entonces de su camarote para anunciar que Dios había oído las plegarias realizadas en favor de ellos. El acontecimiento impresionó tanto a los jamaicanos que dieron a los españoles comida más que suficiente para salvarlos de la inanición.

¿Por qué, pues, si Colón carecía de preparación en ese terreno, fueron sus viajes tan decisivos para la astronomía? Por magnífico que le parezca a un astrónomo de nuestros días saber que hubo un tiempo en que esa disciplina era obligada para todos los estudiantes universitarios, no hemos de olvidar que el nivel del texto de Sacrobosco era rudimentario. La *Sphaera* describía los movimientos diarios y estacionales de la esfera celeste, pero no decía casi nada acerca de los movimientos de los planetas.

Los astrónomos medievales, no obstante, creían que, incrustados en medio de las esferas aristotélicas, había una serie de epiciclos y ecuantes auxiliares, que producían los diferentes movimientos directos y retrógrados de los planetas. Estos mecanismos habían sido descritos por el alejandrino Claudio Ptolomeo hacia el 150 d. C. en su *Almagesto*, una obra tan técnica que casi nadie de la Cristiandad latina había llegado a dominar. Ptolomeo fue también la autoridad geográfica de ese tiempo y sus mapas se aceptaron sin discusión.



3. *BOLA DE FUEGO*, pintada por Alberto Durero en 1492: representa un meteorito de piedra que aterrizó cerca de Ensisheim en Alsacia. Aunque puede argumentarse que el meteorito constituyera el acontecimiento astronómico más espectacular de aquel año, el autor afirma que el descubrimiento del Nuevo Mundo ejerció una influencia mucho mayor en el pensamiento astronómico.

Hasta que en el siglo XV se redescubrió el *Almagesto*. Aparecieron en Europa dos astrónomos con capacidad para entender este tratado fundamental y criticar a los comentaristas de primera hora. Regiomontano y Georg Peuerbach emprendieron juntos una traducción abreviada de la obra maestra de Ptolomeo. Tras la muerte de Peuerbach en 1461, Regiomontano continuó con el proyecto y, para asegurarse una amplia distribución, se convirtió en el primer científico impresor. Pero quien fuera el mayor matemático y astrónomo de su siglo, murió en 1474, sin publicar ni su continuación de la obra de Peuerbach ni su propio tratado de trigonometría, no menos impresionante.

Peuerbach y Regiomontano entendieron cabalmente la astronomía ptolemaica, pero no estaban satisfechos con lo que vieron. En 1464 Regiomontano remitió una crítica de la teoría, breve y penetrante, a otro astrónomo matemático. Las tablas no daban predicciones exactas, según decía. Había comprobado diferencias de tres cuartos de grado entre la posición observada de Venus y la que predecían las tablas; en el caso de Marte, la diferencia era de dos grados completos, y un eclipse lunar de 1461 había terminado una hora antes de la que indicaban los cálculos. Más aún, el diámetro aparente de la luna, según la teoría de Ptolomeo, debería ser, a veces, el doble de grande de lo que es en otros momentos, un fenómeno nunca observado.

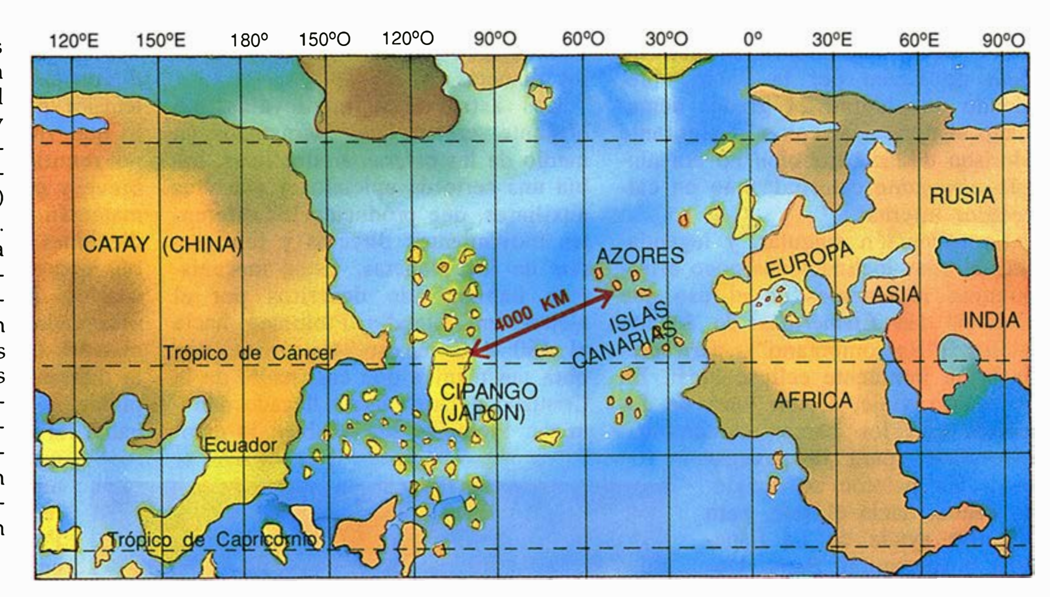
Nicolás Copérnico, nacido dos años antes de la muerte de Regiomontano, era también consciente de los defectos de las predicciones geocéntricas de las posiciones planetarias. En su libro de apuntes, anotó que la posición de Marte se encontraba dos grados por delante de las tablas y la de Saturno un grado y medio por detrás. Pero nunca mencionó este defecto en un texto impreso; sus propias tablas basadas en la teoría heliocéntrica tampoco se esforzaron en la corrección de errores.

La escasa preocupación que Copérnico manifestaba por esas limitaciones reviste el mayor interés. A pesar de todo lo que se ha escrito en contra, los errores en las tablas de las posiciones planetarias no intervenían, para nada, en la elección de un punto de vista geocéntrico o heliocéntrico. Estas dos cosmologías eran, en efecto, transformaciones geométricas que producían predicciones casi idénticas. La mera transición hacia un sistema que tenía por centro el Sol no bastaba, en absoluto, para rendir tablas mejores. Los errores cometidos en las predicciones podrían haberse corregido en una estructura geocéntrica con idéntica soltura, al menos en principio, que en una estructura heliocéntrica.

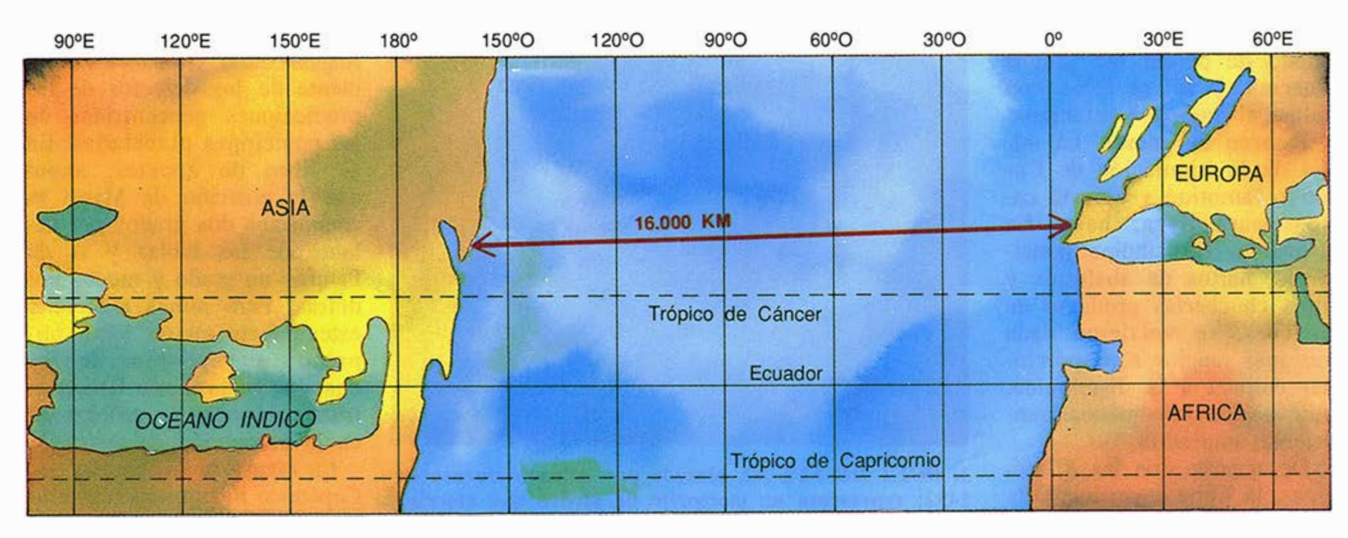
La verdad es que Copérnico no tenía ninguna prueba para su nuevo modelo basada en la observación. Como Galileo diría un siglo más tarde, "no puedo dejar de admirar a quie-

El meridiano terrestre y los continentes

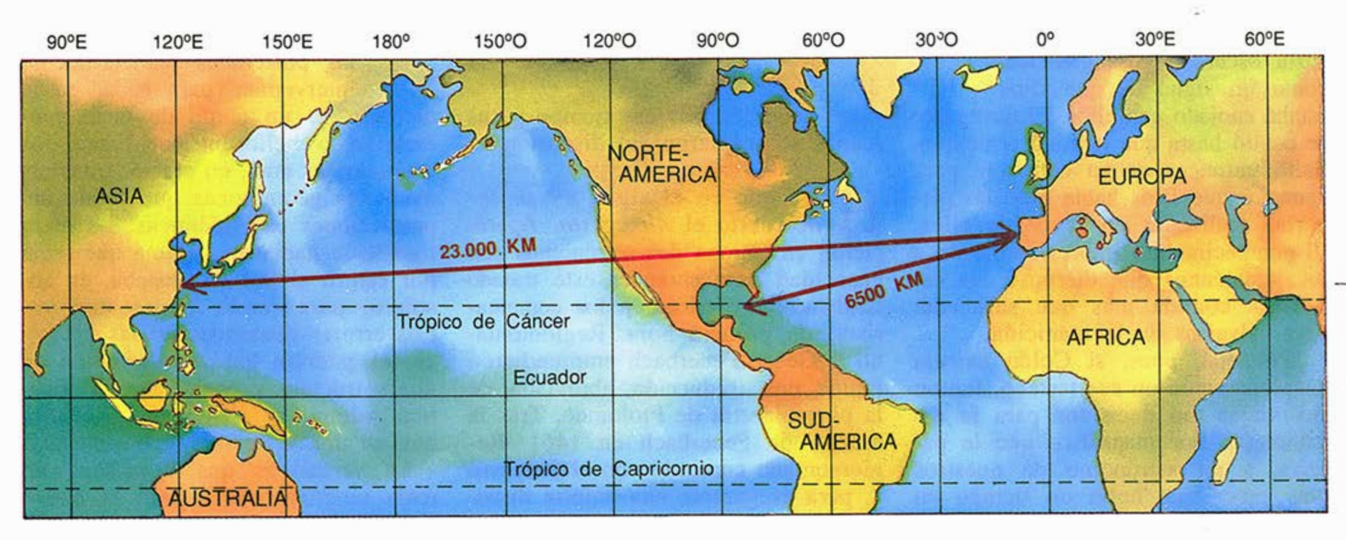
El conflicto entre las creencias de Colón a propósito de la longitud del meridiano terrestre y la disposición de los continentes (*arriba*) y la geografía ptolemaica (*centro*) aparece clara en los mapas. Solamente subestimando la longitud del meridiano terrestre y exagerando la extensión de Asia pudo Colón justificar un viaje a las Indias en dirección oeste. Ambos mapas, por supuesto, omitían los hemisferios americanos (*abajo*). Los continentes del mapa superior están tomados de un globo construido por Martin Behaim en Nuremberg en 1492.



Según Colón



Según Ptolomeo



Mapa moderno

nes aceptaron la doctrina heliocéntrica contra la observación de los sentidos". El astrónomo polaco, por contra, se guió por una visión estética: una "teoría que agrada a la mente".

El punto de vista heliocéntrico explicaba por qué Marte, Júpiter y Saturno parecían invertir el sentido de su recorrido a través del espacio cuando estaban en oposición al Sol. En el sistema ptolemaico, este movimiento retrógrado era un accidente de la naturaleza, un "hecho en sí mismo". Copérnico lo convirtió en un "hecho razonado" y la ausencia de explicación en el sistema de Ptolomeo se convirtió en una anomalía. Una vez establecidas las vinculaciones, resultó obvio por qué la retrogradación para Júpiter era menor que para Marte y por qué la retrogradación para Saturno era menor que para Júpiter.

Copérnico llenó de significado el desplazamiento, misteriosamente lento, de la octava esfera: la precesión de los equinoccios. El descubrimiento de este movimiento había preocupado a los cosmólogos clásicos. Si la Tierra yacía suspendida en el espacio, girando alrededor del Sol y sobre su propio eje, no era difícil concebir un tercer movimiento, un desplazamiento lento y cónico de ese eje.

Estas innovaciones radicales pusieron los cimientos sobre los que Galileo, Kepler y Newton construyeron un nuevo modelo de los cielos. Peuerbach pudo haber hecho la misma transformación geométrica un siglo antes. Los cosmólogos islámicos pudieron realizarla en el siglo IX. ¿Por qué la nueva astronomía esperó hasta el siglo XVI y primeras décadas de la Era de las exploraciones?

Copérnico vivió en un tiempo de cambios rápidos, el más visible de los cuales fue quizá la invención por Gutenberg de la imprenta de caracteres móviles. Con sólo una excepción conocida, todas las fuentes documentales de Copérnico eran libros impresos. Y una vez que su teoría heliocéntrica estuvo escrita, se imprimió con una tirada aproximada de 400 ejemplares, lo que garantizaba una amplia distribución y subsiguiente reflexión sobre sus ideas.

Además, estaba la Reforma. Copérnico era canónigo, mientras que el joven alumno que lo persuadió para imprimir el *De revolutionibus orbium coelestium* era protestante de Wittenberg, cuna del activismo luterano. Eran años de agitación religiosa, en los que muchas ideas tradicionales se pusieron en entredicho.

Copérnico vivió en una época en la que marinos arriesgados reescribían la *Geografía* de Ptolomeo, considerada hasta entonces una autoridad. Copérnico estudiaba en Cracovia cuando Colón emprendió su primer viaje. A la ciudad llegaron muy pronto las noticias sobre los descubrimientos. (La Universidad Jagellónica conserva todavía el globo más antiguo conocido en que aparece el Nuevo Mundo.) Y en el caso de que hubiera abandonado Cracovia antes de su difusión, debió oír tales noticias muy poco después, durante su estancia universitaria en Italia.

El astrónomo alejandrino era incluso mejor conocido, probablemente, por su geografía que por la cosmología geocéntrica que lleva su nombre. La *Geografía*, escrita en el siglo II d. C., dejaba un legado simpar a los cartógrafos en sus instrucciones para la proyección de mapas. Reelaborando información clasificada a partir de los relatos de viajeros y de su predecesor, Marino de Tiro, Ptolomeo había reunido sus mejores estimaciones de las latitudes y longitudes de los lugares del mundo entonces conocido. Estas, a su vez, sirvieron de base para atlas espectaculares publicados entre 1480 y 1490. Pero desde el año 1500, su reputación comenzó a erosionarse rápidamente. Aunque el propio Colón creyera que se ajustaba a los perfiles de la vieja geografía, su aterrizaje en las "Indias" desafiaba los mapas aceptados. Y cuando se hizo evidente que había descubierto un nuevo continente, el globo clásico quedó añejo. Y si se había desmoronado la *Geografía* de Ptolomeo, ¿por qué no había de cuestionarse también su cosmología?

Los fallos de la astronomía clásica denunciados por Regiomontano no fueron corregidos en su mayoría por Copérnico. Pero el nudo gordiano de la reforma definitiva de la astronomía yacía en el modelo heliocéntrico: ofrecía una reordenación absoluta del pensamiento humano y allanaba el camino para los brillantes logros técnicos de Kepler y Galileo.

El *De revolutionibus* de Copérnico se publicó en Nuremberg en 1543, en un mundo ya preparado para el cambio. Trece años más tarde, el editor de Basilea Henricpetri sacó una segunda edición de la obra. Uno de cuyos ejemplares cayó en manos de Tomas Digges, el primer astrónomo inglés en convertirse a la nueva cosmología. Sobre el título de su copia escribió *Vulgi opinio error*, "la opinión común es errónea", dando a entender que ya no aceptaba la clásica noción de una Tierra fija en el centro del universo.

Al ofrecer una traducción inglesa de sus principales pasajes cosmológicos, Digges escribió: "Creí conveniente publicar esto para que al fin las nobles mentes inglesas (capaces de alcanzar tal deleite inaccesible para las clases más bajas) no se sientan defraudadas por una parte tan noble de la filosofía." Incluyó en su presentación un magnífico diagrama heliocéntrico, que presentaba un dato insólito: las estrellas ya no estaban prendidas en una envoltura distante, sino que se hallaban diseminadas hacia el infinito. "Y por tanto", concluía, "inmóviles". Ofrecido en 1576, este modelo revelaba un pensar revolucionario, un paso de gigante desde el cerrado mundo de los antiguos hacia el vasto mundo de hoy.

Digges y varios contemporáneos, entre ellos Michael Maestlin, maestro de Kepler, investigaron intensamente, aunque en vano, métodos empíricos que confirmaran el ordenamiento planetario centrado en el Sol. Continuó siendo una cuestión de fe a la que se vieron empujados, por una visión estética, quienes percibieron su unidad. El creyente tuvo también que desechar la *Física* de Aristóteles, aceptada hasta entonces, que predecía que aves y nubes se rezagaban mientras la Tierra giraba sobre su eje. Tal como declaró otro astrónomo contemporáneo, Tycho Brahe: "Copérnico no ofende en ninguna parte los principios matemáticos, pero lanza la Tierra, ese cuerpo inerte y perezoso incapaz de moverse, a un movimiento tan vertiginoso como el de las antorchas etéreas [las estrellas]".

A falta de pruebas empíricas, la adopción del modelo copernicano necesitó un clima de opinión dispuesto a aceptar nuevas ideas, que abandonara las viejas tradiciones en las que el antiguo saber se mantenía en un pedestal. Colón ayudó a traer ese nuevo clima intelectual. Su travesía demostró decisivamente cuán incompleta era la geografía ptolemaica y preparó así el camino para un nuevo planteamiento del lugar de la Tierra en el cosmos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WHEN DO ANOMALIES BEGIN? Alan Lightman y Owen Gingerich en *Science*, vol. 255, págs. 690-695, 7 de febrero de 1992.

THE METEORITE OF ENSISHEIM: 1492 TO 1992. Ursula B. Marvin en *Meteoritics*, vol. 27, n.º 1, págs. 28-72; marzo de 1992.

COLUMBUS AND AN ECLIPSE OF THE MOON. Donald W. Olson en *Sky and Telescope*, vol. 84, n.º 4, págs. 437-440; 1992.

Velocidad de expansión y tamaño del universo

La edad, evolución y destino del universo dependen de la rapidez con que éste se expanda. Gracias a las nuevas técnicas para medir el tamaño del universo, se ha afinado más en el cálculo de la velocidad de expansión

Wendy L. Freedman

Todas las galaxias, incluida nuestra Vía Láctea, se alejan unas de otras en virtud de la gran explosión inicial ("big bang"), violento nacimiento del universo. A lo largo del siglo XX se ha descubierto dicha expansión, se ha detectado la radiación de fondo en microondas procedente de la explosión original, se ha inferido la fuente de los elementos químicos del universo y se ha representado la macroestructura y el movimiento de las galaxias. No obstante esos y otros muchos avances, quedan sin resolver cuestiones elementales: ¿cuánto tiempo ha transcurrido desde el inicio de tan colosal expansión? ¿Continuará el universo en expansión indefinida o la gravedad le obligará a invertir esa dirección para colapsar sobre sí mismo?

Durante decenios, los cosmólogos se han esforzado por responder a estas preguntas midiendo la escala de tamaños y la velocidad de expansión del universo; tarea para la que se precisa establecer primero cuál es la velocidad a que se mueven las galaxias y a qué distancia se encuentran. Disponemos de técnicas fiables para calcular la velocidad de las galaxias; no así para estimar su lejanía. A lo largo de los últimos diez años, varios grupos de astrónomos han elaborado, de forma independiente, métodos mejores para medir tales distancias, lo que ha comportado una estimación enteramente nueva de la velocidad de expansión.

Pruebas de origen dispar sugieren una velocidad de expansión rápida, señal de un universo joven, de unos diez mil millones de años de edad; y apuntalan también la imagen de una expansión indefinida. Mas, por muchas razones, mis colegas y yo no consideramos definitiva esta conclusión, y defendemos la bondad de nuestras propias técnicas.

Es esencial una medición precisa de la velocidad de expansión, no sólo para determinar la edad del universo y su destino, sino también para acotar las teorías cosmológicas y los modelos de formación de galaxias. Importa, además, para estimar magnitudes fundamentales; entre otras, la cantidad de materia no luminosa en las galaxias y el tamaño de los cúmulos galácticos. Y, dado que se requieren medidas exactas de la distancia para calcular la luminosidad, la masa y el tamaño de los cuerpos celestes, vemos que el problema de la escala de distancias cosmológicas, o la determinación de la velocidad de expansión, afecta, en mayor o menor medida, a la astronomía extragaláctica entera.

Las mediciones de la velocidad de expansión del universo se iniciaron

WENDY L. FREEDMAN se halla adscrita al Observatorio Carnegie de Pasadena, desde 1987. Nació en Toronto, en cuya universidad se doctoró en astronomía y astrofísica, hace nueve años. Dentro del programa del telescopio Hubble, trabaja en "la escala de distancias extragalácticas".



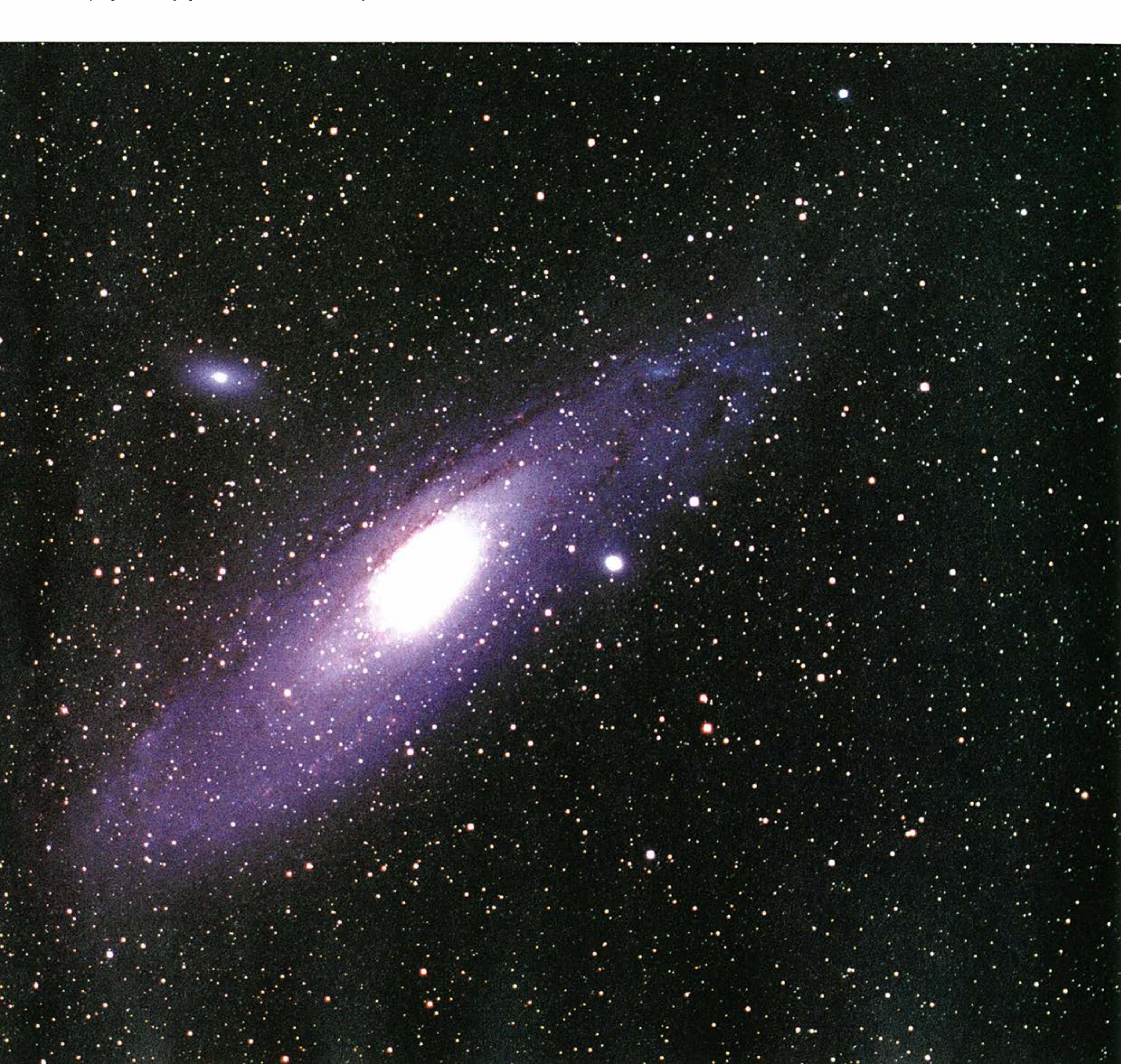
1. LA GALAXIA ANDROMEDA ilustra claramente la dificultad de calcular la velocidad de expansión del universo. Andrómeda dista 2,5 millones de años luz de la Tierra, pero aún experimenta la atracción de nuestra propia galaxia. En consecuencia, su movimiento relativo refleja muy poco la expansión del universo. Observando galaxias remotas es posible detectar la expansión, mas no se conoce su velocidad precisa por ser difícil medir la lejanía de las galaxias distantes.

hace unos sesenta años. En 1929, Edwin P. Hubble, de la Institución Carnegie, descubrió que casi todas las galaxias se alejaban de la Tierra a velocidades enormes. Advirtió también un fenómeno notable: la velocidad de recesión era proporcional a la distancia de la galaxia. Sus observaciones constituyeron la primera prueba de que el universo entero se hallaba en expansión.

Hubble determinó la velocidad de expansión, cantidad que luego se llamaría constante de Hubble: la velocidad de recesión de la galaxia dividida por su distancia. Sin mayor precisión suele cifrarse dicha constante en 100 kilómetros por segundo y por megaparsec. (Llámase megaparsec la distancia que la luz recorre en 3,26 millones de años.) Acorde con ello, una galaxia situada a 50 megaparsec se aleja a unos 5000 kilómetros por segundo, y otra que diste 500 megaparsec se moverá a la increíble velocidad de 180 millones de kilómetros por hora.

Sesenta años llevan los astrónomos debatiendo en torno al valor correcto de la velocidad de expansión. Hubble obtuvo la cantidad de 500 kilómetros por segundo y por megaparsec (km/s/Mpc). A la muerte de éste en 1953, su discípulo Allan R. Sandage, también de Carnegie, continuó el programa cartográfico de expansión del universo. Conforme se fueron realizando observaciones más precisas y extensas, se fue revisando a la baja el valor original de Hubble, hasta dejarlo acotado en el intervalo de 50 a 100 km/s/Mpc, lo que implica un universo mucho mayor que lo sugerido por las primeras mediciones.

En los últimos veinte años, la cuantía estimada de la constante de Hubble se ha asentado en ese mismo intervalo, cayendo preferentemente hacia sus extremos. A modo de muestra, Sandage y Gustav A. Tammann, de la Universidad de Basilea, defendieron un valor de 50 km/s/Mpc, mientras que Gérard de Vaucouleurs, de la Universidad de Texas, sostenía un valor de



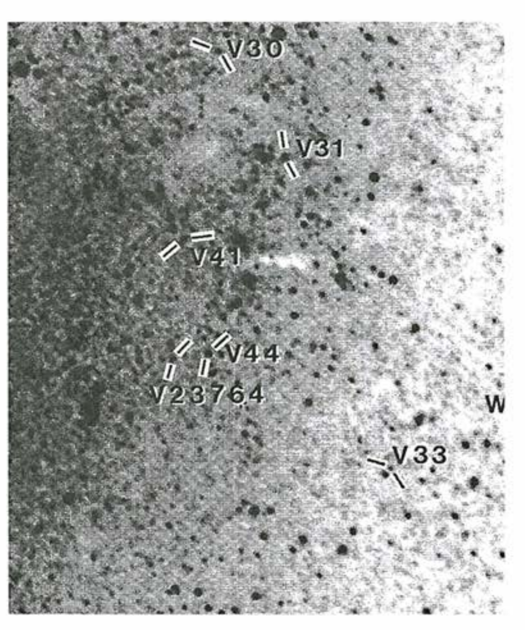
Luminosidad variable de las Cefeidas

Una Cefeida variable es una estrella bastante joven, cuya masa multiplica varias veces la solar y cuya luminosidad cambia de manera periódica: brilla y después se atenúa con más lentitud. Su pulsación se debe a que la fuerza de la gravedad que actúa en la atmósfera de la estrella no está del todo compensada por la presión de los gases calientes que salen del interior de la misma.

Este desequilibrio viene provocado por los cambios que experimenta su atmósfera, uno de cuyos componentes principales es helio simplemente ionizado (átomos de helio que han perdido un solo electrón). A medida que la radiación emerge de una Cefeida, el helio simplemente ionizado de la atmósfera absorbe y dispersa tal radiación, y puede convertirse en helio doblemente ionizado (perdiendo un segundo electrón el átomo). En consecuencia, la atmósfera se hace más opaca, y la radiación escapará difícilmente de la atmósfera. La presión generada por la interacción entre radiación y materia empuja hacia fuera la atmósfera de la estrella, con lo que la Cefeida crecerá en tamaño y luminosidad.

Al expandirse, la atmósfera también se enfría. A temperaturas menores, el helio regresa al estado de simplemente ionizado. La radiación puede entonces atravesar la atmósfera con mayor libertad, relajándose la presión sobre la misma. Finalmente, la atmósfera se colapsa de nuevo y torna a su tamaño inicial, con lo que la Cefeida recupera su brillo original. Después, se repite el ciclo.

El comportamiento de las Cefeidas se predice con gran precisión en los modelos teóricos de la evolución del interior de las estrellas, así como en las simulaciones del flujo de la radiación. Los astrónomos confían en las Cefeidas como indicadores de distancia por comprender bien la física que subyace en estas estrellas jóvenes y haberlas observado con gran detalle.



2. DIVERSAS CEFEIDAS VARIABLES aparecen en la galaxia M33, miembro de nuestro propio Grupo Local. Cada Cefeida viene señalada por un número y la letra V. Los puntos oscuros representan estrellas; las manchas blancas irregulares son regiones llenas de polvo.

100 km/s/Mpc. La controversia creó una situación insatisfactoria en la que cada uno ha podido optar por cualquier valor dentro de ese rango.

En principio, la determinación de la constante de Hubble es sencilla, ya que sólo requiere medir la distancia y la velocidad. La segunda de estas mediciones no presenta problemas, mas no así la primera. A fin de obtener la velocidad, los astrónomos dispersan la luz que procede de una galaxia y registran su espectro, el cual se compone de rayas espectrales discretas. Estas líneas, que aparecen a longitudes de onda características, se deben a la emisión o absorción de determinados elementos del gas y las estrellas que forman la galaxia. Cuando la galaxia se aleja de la Tierra, las posiciones de las líneas espectrales se han trasladado a longitudes de onda mayores en una cuantía proporcional a la velocidad, en un efecto de corrimiento hacia el rojo.

Por el contrario, a la hora de determinar la distancia a una galaxia, los astrónomos pueden elegir uno de entre múltiples métodos complejos, cada uno con sus ventajas, pero sin que ninguno pueda considerarse perfecto.

Podemos medir con precisión la distancia a que se encuentran las galaxias cercanas tomando por punto de referencia una Cefeida variable, estrella cuyo brillo varía a lo largo del tiempo de un modo periódico e inconfundible. En efecto, mientras transcurre la primera parte del ciclo, la luminosidad de una Cefeida se intensifica rápidamente, para decrecer lentamente durante el resto del ciclo. Por término medio, las Cefeidas variables brillan 10.000 veces más que el Sol.

Merece la pena destacar la posibilidad de calcular la distancia a una Cefeida a partir de su período (duración de su ciclo) y de su brillo aparente medio (luminosidad percibida desde la Tierra). En 1908, Henrietta S. Leavitt, del Observatorio de Harvard, descubrió que el período de una Cefeida guardaba una estrecha correlación con su brillo: cuanto más largo era el período, más lucía la estrella. Esta relación se apoya en el hecho de que el brillo de la Cefeida es proporcional a su área superficial. Las Cefeidas grandes y brillantes pulsan con un período largo, lo mismo que las campanas grandes resuenan a una frecuencia baja (período largo).

Anotando la variación de la luminosidad en función del tiempo, de una Cefeida, se infiere su período y su luminosidad aparente media, para así calcular su luminosidad absoluta (es decir, el brillo aparente que tendría la estrella si estuviera a una distancia normalizada de 10 parsec). Se sabe, además, que la luminosidad aparente decrece a medida que aumenta la distancia. Todo lo cual nos faculta para estimar la distancia a una Cefeida a partir de la relación entre el brillo absoluto y el brillo aparente.

Hay muchas razones para considerar las Cefeidas valiosos indicadores de la distancia; en particular, gracias a su comportamiento cíclico y su alta luminosidad no resulta difícil localizarlas y someterlas a medida.

En los años veinte, Hubble se apoyó en las Cefeidas variables para establecer la existencia de galaxias allende la Vía Láctea. Al estudiar fotografías de la nebulosa de Andrómeda, llamada también M31, identificó unas débiles imágenes en forma de estrella cuyo brillo variaba ligeramente con el tiempo; demostró que su comportamiento coincidía con el de las Cefeidas variables cercanas. Midiendo el brillo aparente y los períodos de las Cefeidas de la M31, dedujo que esta nebulosa distaba del Sol no pocos cientos de miles de

años luz, que la situaba fuera de la Vía Láctea. De los años treinta a los sesenta, Hubble, Sandage y otros trabajaron afanosamente por descubrir Cefeidas en galaxias cercanas. Lograron medir la lejanía de una docena de galaxias. Con ello la deducción de la constante de Hubble pudo afirmarse sobre bases más sólidas.

El método de las Cefeidas halla uno de sus principales contratiempos en el polvo interestelar, capaz de amortiguar la luminosidad aparente; las partículas absorben, dispersan y enrojecen la luz de todos los tipos de estrellas. Los efectos del polvo se dejan sentir más en la luz azul y ultravioleta. De ahí que sea necesario observar las Cefeidas a longitudes de onda del infrarrojo, donde los efectos son menos apreciables, o a muchas y distintas longitudes de onda del visible, para así ponderar los efectos y aplicar las correcciones pertinentes.

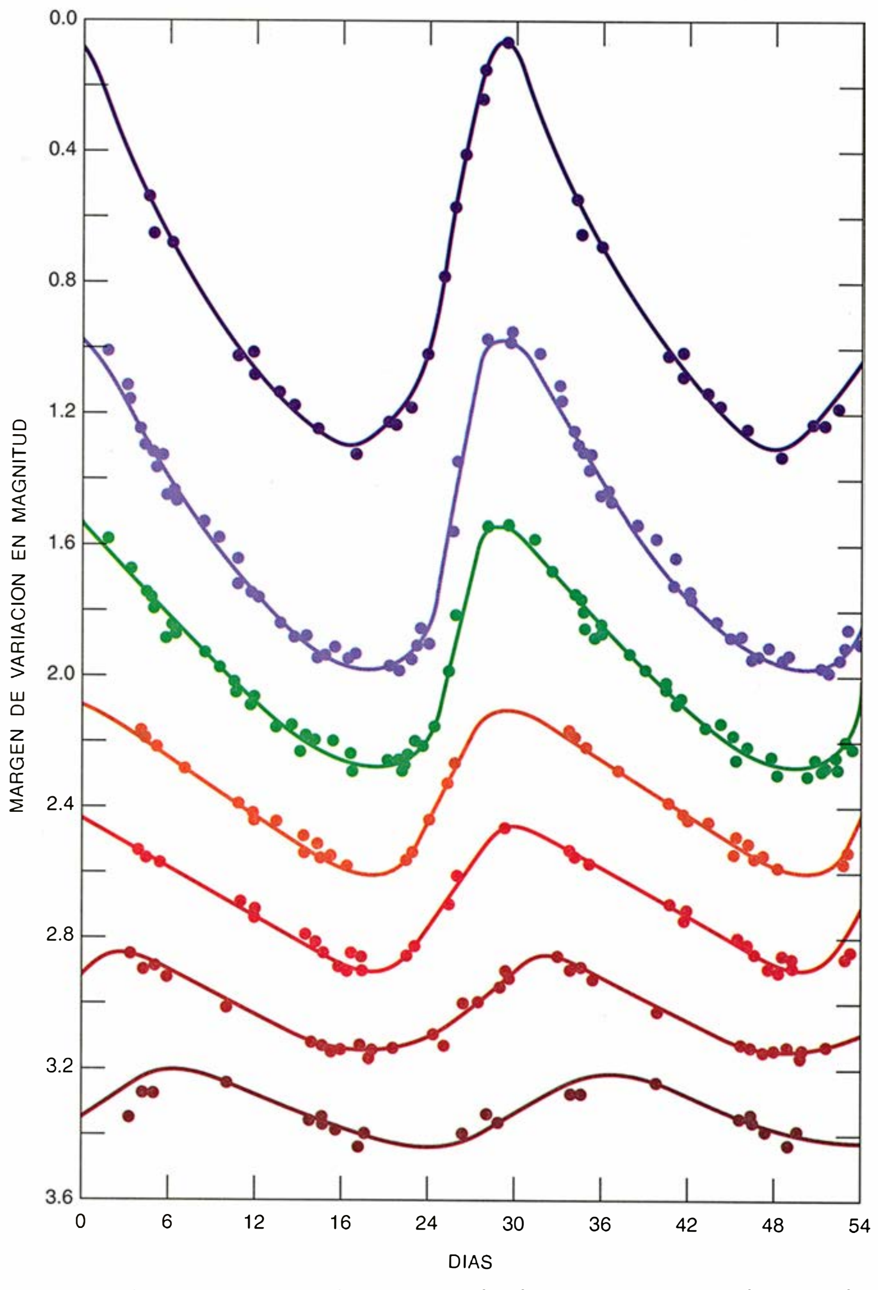
En virtud de lo anterior, para determinar la lejanía de las Cefeidas, se necesitan telescopios y detectores dotados de extrema sensibilidad a la luz en toda una gama de longitudes de onda. Hubble, Sandage y sus contemporáneos utilizaron placas fotográficas que respondían a la luz verde y azul y cuyo rendimiento no llegaba al 0,1 %. Hoy se emplean dispositivos de acoplamiento de carga (DAC), construidos con finas obleas de silicio. Estos dispositivos pueden detectar luz de longitudes de onda entre el azul y el rojo, con rendimiento superior al 50 por ciento. Cuando un fotón incide sobre un DAC libera un electrón del silicio, lo que crea una señal detectable.

Los DAC multiplican el rendimiento observacional que se obtenía con las placas fotográficas. Además, registran el brillo de una fuente luminosa con mucha mayor precisión que los materiales fotográficos. Se han convertido, pues, en detectores ideales para estudiar las Cefeidas y compensar los efectos de los granos de polvo.

Con mi colaborador y marido Barry F. Madore, del Instituto de Tecnología de California, he vuelto a medir cuidadosamente, durante los últimos diez años, las distancias a las galaxias más próximas. Nos hemos servido de los DAC y los grandes telescopios reflectantes de Mauna Kea (Hawai), Las Campanas (Chile) y Monte Palomar (California), entre otros; podemos afirmar que hemos determinado las distancias a las galaxias próximas con una precisión muy superior a la conseguida por cuantos nos precedieron.

Por desgracia, para obtener la constante de Hubble no podemos emplear la misma técnica que para medir las distancias a las galaxias con Cefeidas. Poseen estas estrellas brillo suficiente para vérselas en galaxias inmediatas, pero no en las distantes. Ahora bien, aun cuando las galaxias cercanas también participan en la expansión del universo, las interacciones por gravitación entre galaxias contiguas pueden provocar que algunas se muevan mucho más deprisa o más despacio que el resto del universo. Para calcular, pues, la constante de Hubble resulta forzoso determinar la lejanía a que se hallan galaxias remotas, tarea nada fácil.

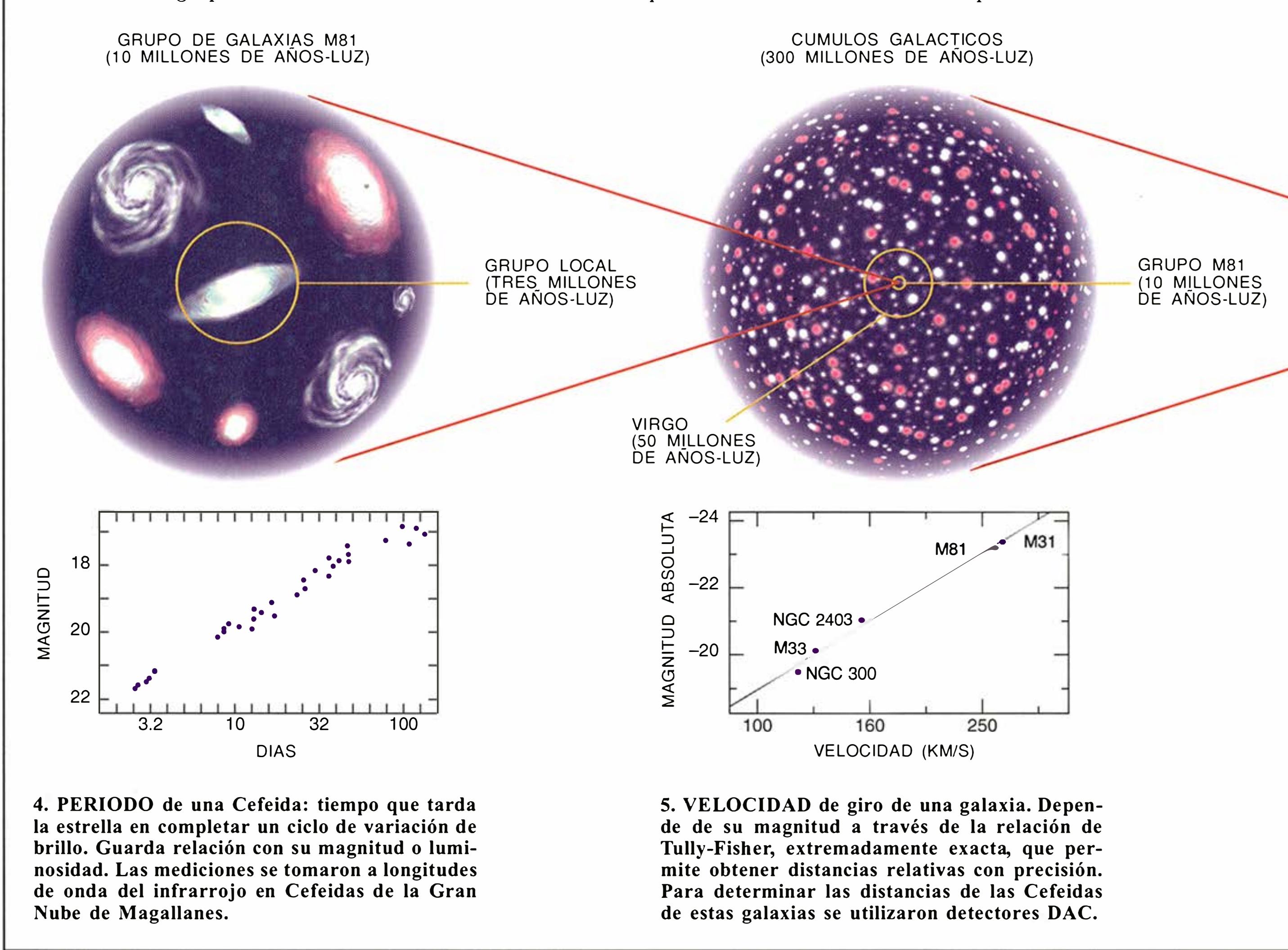
Pero no hasta el extremo de que no se hayan desarrollado métodos para calcular las distancias a dichas galaxias remotas. Muchas de estas técnicas necesitan calibrarse mediante la escala de distancias de las Cefeidas. Consideradas por ello indicadores secundarios de la distancia, las técnicas en cuestión se basan



3. LA MAGNITUD DE UNA CEFEIDA varía cíclicamente en un período de días. Cada línea en color corresponde a observaciones a distintas longitudes de onda de radiación (del ultravioleta al infrarrojo cercano). La amplitud de la variación luminosa es máxima hacia las longitudes de onda azul y ultravioleta. Las Cefeidas se descubren mejor con detectores sensibles a la luz azul.

¿A qué distancia se hallan las galaxias?

Para medir la lejanía de una galaxia podemos valernos de varias técnicas, si bien la precisión de las medidas decrece al aumentar la distancia de la galaxia. Observando las Cefeidas variables con telescopios terrestres, se han determinado con precisión las distancias de galaxias lejanas, como el grupo M81, a unos 10 millones de años luz. Con la misma técnica y el *Telescopio Espacial Hubble* tal vez podrá medirse la distancia al cúmulo de Virgo, a unos 50 millones de años luz. Midiendo el brillo de una galaxia y su velocidad de rotación, determinamos la distancia de galaxias alejadas 300 millones de años luz. Otra técnica prometedora se basa en el brillo aparente máximo de ciertas



4. PERIODO de una Cefeida: tiempo que tarda la estrella en completar un ciclo de variación de brillo. Guarda relación con su magnitud o luminosidad. Las mediciones se tomaron a longitudes de onda del infrarrojo en Cefeidas de la Gran Nube de Magallanes.

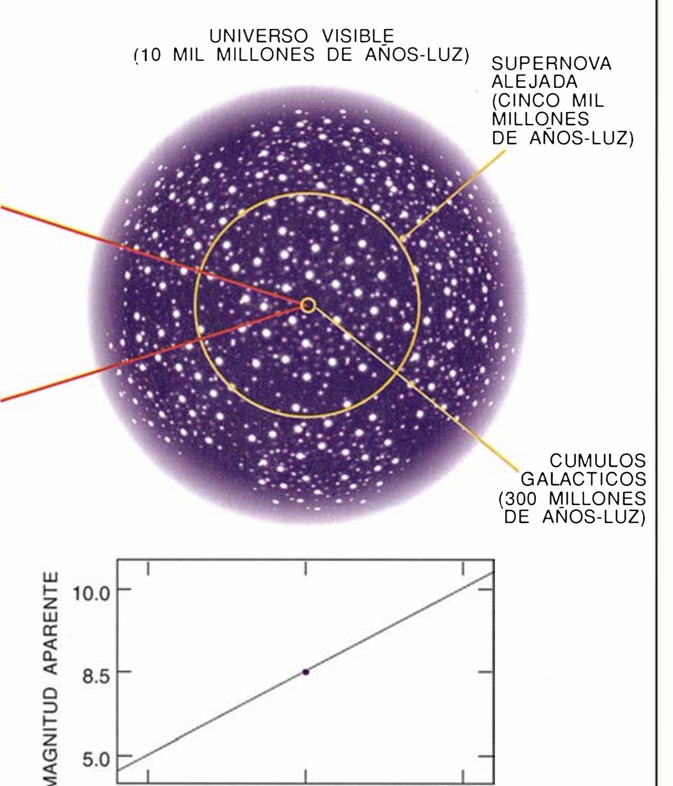
5. VELOCIDAD de giro de una galaxia. Depende de su magnitud a través de la relación de Tully-Fisher, extremadamente exacta, que permite obtener distancias relativas con precisión. Para determinar las distancias de las Cefeidas de estas galaxias se utilizaron detectores DAC.

en las propiedades de ciertos tipos de objetos brillantes del interior de las galaxias, o bien en las propias características de las galaxias. Mas no existe acuerdo entre los expertos a la hora de escoger indicadores secundarios fiables, concediendo que alguno lo sea. Discrepan, además, en cuanto al modo en que deben aplicarse los métodos y en la necesidad consiguiente de ajustar los resultados para compensar diversos efectos que pudieran distorsionarlos. Las discrepancias en la elección de los métodos secundarios están en la raíz de casi todo el debate actual acerca de la constante de Hubble.

Entre las técnicas de medición prometedoras destaca la que se funda en una correlación entre el brillo de la galaxia y su velocidad de rotación. Las galaxias de alta luminosidad suelen poseer una masa mayor que las de baja luminosidad; por tanto, las brillantes giran más lentamente que las galaxias de luz tenue. Aunque se conocía tal correlación, no se empleó de forma generalizada para medir las distancias hasta 1977. Lo hicieron R. Brent Tully, de la Universidad de Hawai, y J. Richard Fisher, del Observatorio Nacional de Radioastronomía.

La relación de Tully-Fisher da la máxima precisión en medidas de distancia, cuando se observa el brillo de una galaxia a longitudes de onda del infrarrojo. Para ello hay dos razones. La primera, que las estrellas de luminosidad predominante de las galaxias emiten la mayor parte de su radiación en longitudes de onda del infrarrojo cercano; la segunda, que, conforme la radiación infrarroja atraviesa el espacio, se dispersa menos cuanto mayor es la longitud de onda. Hace algo más de diez años, la relación de Tully-Fisher para longitudes de onda del infrarrojo fue ya utilizada por Marc Aaronson, de la Universidad de Arizona, Jeremy R. Mould, del Caltech, John P. Huchra, de la Universidad de Harvard, y Gregory D. Bothun, de la Universidad de Oregón. Desde entonces, varios grupos independientes han corroborado abundantemente el método de Tully-Fisher, y, lo que encierra mayor interés, han demos-

estrellas en explosión, las supernovas de tipo Ia. En principio, tales explosiones podrían llegar a detectarse a una distancia aproximada de la mitad del universo visible. La técnica de las supernovas es mucho menos precisa que el método de las Cefeidas (*gráfico inferior*).



6. EL BRILLO ABSOLUTO MAXIMO de una supernova del tipo Ia es constante, según la teoría; su brillo aparente guarda, pues, relación con su distancia a la Tierra. Pero sólo ha podido hacerse una medición para calibrar esta escala de distancias.

trado que la relación no parece depender del entorno: se mantiene la misma en las zonas densas de cúmulos muy poblados, en las regiones más externas de tales cúmulos y en galaxias más o menos solitarias.

Por estas y otras razones, se acepta —aunque hay voces discrepantes— que la relación de Tully-Fisher constituye uno de los indicadores de distancia secundarios más precisos existentes. Se emplea para estimar distancias de hasta 300 millones de años luz. Otra ventaja del método es que para su calibración puede recurrirse a la técnica de las Cefeidas. Como desventaja, cabe señalar el desconocimiento de los astrónomos con respecto al hilván teórico de esa relación de Tully-Fisher.

Se han desarrollado otras dos técnicas de medición de distancias. Una, la ideada por George Jacoby y su grupo del Observatorio Nacional de Astronomía Optica, apela a las nebulosas planetarias. Se forman éstas cuando las estrellas de masa comparable a la del Sol se aproximan al final de su ciclo vital; su luminosidad, según observaron, no excede de un límite superior bien definido. Para calcular la distancia a una galaxia, midieron la luminosidad aparente de las nebulosas planetarias más brillantes de aquella galaxia. En la calibración del nuevo método utilizaron galaxias cuyas distancias se conocían en referencia a las Cefeidas. Las medidas de lejanía que así obtuvieron concordaban muy bien con las conseguidas con el método de Tully-Fisher, en los casos en que se disponía de ambos datos.

El segundo método, desarrollado por el equipo de John L. Tonry, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, se basa en el aspecto granuloso de las galaxias cercanas; la superficie de las remotas, por contra, presenta un brillo distribuido de manera más uniforme. Ese fenómeno obedece a que la granularidad decrece con la distancia, al ser cada vez más difícil la labor de resolver las estrellas individuales. Por consiguiente, la lejanía de una galaxia puede inferirse a partir del grado de fluctuación del brillo aparente a través de su superficie. Tras determinar distancias galácticas mediante esta técnica del brillo superficial, Tonry comparó los resultados con los obtenidos por los métodos de las nebulosas planetarias y de Tully-Fisher. Comprobó que había un acuerdo excelente. Teniendo en cuenta la inseguridad que siempre ha afectado a las mediciones de distancias extragalácticas, los hallazgos de Tonry resultan muy sugestivos; el inconveniente es que disponemos sólo de un corto número de Cefeidas calibradoras para ambos métodos.

Otro indicador de distancias que encierra grandes posibilidades estriba en las supernovas de tipo Ia. (Las supernovas son explosiones catastróficas que señalan la muerte de ciertas clases de estrellas.) Se producen supernovas del tipo Ia en sistemas de estrellas dobles en los que una de las estrellas es una enana blanca, objeto muy denso. La explosión se produce cuando se transfiere, a la enana blanca, masa de la estrella acompañante. Puesto que entonces se libera una ingente cantidad de radiación, deberíamos poder observar supernovas que distaran tal vez hasta cinco mil millones de años luz, es decir, la mitad del radio del universo visible.

Las supernovas del tipo Ia constituyen buenos indicadores de distancia, ya que en su momento de máximo brillo producen todas la misma cantidad de luz aproximadamente. Partiendo de esa información, nos es dado inferir la distancia a que se encuentran.

Pero las supernovas son sucesos raros, lo que dificulta su descubrimiento y, sobre todo, su calibración. Por culpa de esa misma escasez, es muy pequeña la posibilidad de que aparezca una supernova del tipo Ia en una galaxia suficientemente cercana para que en ella midamos también las Cefeidas. La verdad es que hubo que esperar al último par de años para que el grupo de Sandage realizara la primera medición directa de la distancia a una galaxia de la cual se sabe que ha albergado una supernova Ia. Para lograrlo, observaron Cefeidas valiéndose del *Telescopio Espacial Hubble*. Aunque su trabajo signifique un avance importante, no basta un resultado aislado para calibrar con precisión la escala de distancias de supernovas.

Merecen mencionarse otros dos métodos de determinación de la constante de Hubble, independientes de la escala de distancias de las Cefeidas y útiles para medir distancias en las inmensas escalas cosmológicas. Además, las aplicaciones provisionales de uno y otro abogan por un menor valor de la constante de Hubble.

El primero de estos métodos alternativos se basa en el efecto de las lentes gravitatorias: la luz proveniente de una fuente lejana puede desviarse al pasar cerca de una galaxia en su camino hacia la Tierra. En los alrededores de la galaxia, la luz sigue diversas trayectorias, unas más largas que otras, llegando por consiguiente a la Tierra en instantes distintos. Si la luminosidad de la fuente varía de manera característica, la señal correspondiente se advertirá pri-



7. HENRIETTA S. LEAVITT, del observatorio de Harvard, encontró en 1908 una correlación entre el período de una Cefeida variable y su brillo absoluto. Esta correlación permite a los astrónomos medir las distancias a las galaxias más cercanas.

mero en la luz que llega por el trayecto más corto y se observará de nuevo, algo después, en la luz que ha seguido el trayecto más largo. El tiempo transcurrido entre los instantes de llegada denuncia la diferencia en longitud entre las dos trayectorias luminosas. A partir de ahí, aplicando un modelo teórico de la distribución de masa de la galaxia, podemos calcular un valor de la constante de Hubble.

El segundo método saca partido del efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZ). Cuando los fotones procedentes del fondo cósmico de microondas atraviesan cúmulos galácticos aumentan su energía al chocar con electrones del plasma caliente (rayos X) que se encuentra en los cúmulos; de la colisión resulta una merma del fondo de microondas hacia la posición del cúmulo. Sabremos la lejanía del cúmulo por comparación entre las distribuciones de microondas y de rayos X. Para determinar esa distancia, sin embargo, debe también conocerse la densidad media de los electrones, su distribución y su temperatura, y se ha de disponer de una medida exacta de la disminución de la temperatura del fondo de microondas. Calculada así la distancia del cúmulo, y medida su velocidad de recesión, podrá obtenerse la constante de Hubble.

El método SZ y la técnica de las lentes gravitatorias merecen un voto de confianza, aunque no se han sometido todavía a contrastación rigurosa. Si queremos saber la imprecisión que les rodea, tendremos que descubrir más objetos dotados de las propiedades mencionadas.

Prosigue el debate en torno al método óptimo de determinación de la lejanía de las galaxias remotas, lo que significa que se esgrimen opiniones contrapuestas acerca de cuál sea la mejor estimación actual de la constante de Hubble. Sandage y sus colaboradores han dado un valor provisional de 45 km/s/Mpc, fiados en el método de las supernovas del tipo Ia. El método SZ y la técnica de las lentes gravitatorias apoyan también un valor bajo de dicha constante.

Mi equipo ha obtenido una estimación mejor. Básase en el empleo de mediciones recientes de Cefeidas para calibrar, una a una, la relación de Tully-Fisher en el infrarrojo; fúndase también en la técnica de las nebulosas planetarias y en el método de fluctuación superficial del brillo. Estas tres técnicas independientes dan resultados en excelente acuerdo: un valor de la constante de Hubble elevado, alrededor de 80 km/s/Mpc.

Nuestras mediciones y las de nuestros colegas inciden en muchos aspectos relativos a la edad, la evolución y el destino del universo. Un valor bajo de la constante de Hubble implica un universo viejo, mientras que un valor elevado sugiere una mayor "juventud". En particular, una constante de Hubble de 100 km/s/Mpc indica que la edad del universo está comprendida entre 7000 y 10.000 millones de años (según la cantidad de materia que exista y de la correspondiente desaceleración que ésta provoque). Un valor de 50 km/s/Mpc sugiere, sin embargo, una edad comprendida entre 15.000 y 20.000 millones de años.

¿Y qué suerte correrá el universo? Siendo baja la densidad media de materia en el cosmos, según las actuales estimaciones obtenidas por observación, el modelo estándar vigente predice que la expansión del universo proseguirá sin fin. Pero la teoría afirma también que la masa que encierra no se limita a la materia luminosa. (De hecho, la búsqueda de esta materia "oscura" se ha convertido en campo de intensa investigación.) Para responder sin ambigüedad a la pregunta sobre el destino final, los cosmólogos no sólo deben conocer la constante de Hubble y la densidad de materia media del universo, sino también disponer de una medida independiente de su edad. Estas tres magnitudes son necesarias para determinar de un modo unívoco la geometría y la evolución del universo.

Una constante de Hubble con un valor alto tendría profundas implicaciones en nuestra forma de entender la evolución de las galaxias y del universo. Si le asignamos un valor de 80 km/s/Mpc, resulta que la edad del universo estaría entre los 8000 y los 12.000 millones de años (dejando un margen de incertidumbre en el valor de la densidad media del universo), valores todos ellos inferiores a los que la teoría deduce para la edad de los cúmulos globulares. Se cree que esos viejos sistemas de estrellas se contarían entre los primeros objetos que se formaron en nuestra galaxia; su edad se cifra entre 13.000 y 17.000 millones de años. Obviamente, esta edad no puede ser mayor que la del propio universo.

Suele aducirse la edad estimada de los cúmulos globulares para preferir, a priori, un valor reducido de la constante de Hubble y, por tanto, una edad mayor para el universo. Algunos objetan, sin embargo, la posibilidad de que los modelos teóricos de cúmulos globulares, de los que tales estimaciones dependen, no estén bien asentados y partan de hipótesis inexactas. Se recuerda, por ejemplo, que los modelos se apoyan en el conocimiento de las proporciones exactas de ciertos elementos presentes en los cúmulos globulares, en concreto, el oxígeno y el hierro. Además, la precisión de la edad requiere una medición cabal de las luminosidades de las estrellas de tales cúmulos globulares, lo que, a su vez, exige valorar con exactitud la lejanía de los mismos. Considerando que puede haber errores tanto en las mediciones de la constante de Hubble como en los modelos y las distancias de los cúmulos globulares, no es fácil ponderar la gravedad de la discrepancia de edad manifiesta entre el universo y estos sistemas estelares.

Un valor elevado de la constante de Hubble plantea otro problema delicado: no encajaría en las teorías estándar sobre la formación de las galaxias y su distribución por el espacio. Especulan éstas, por ejemplo, sobre cuánto tiempo se necesita para desarrollar la macroacumulación observada en la distribución de las galaxias. Ante una constante de Hubble alta —y, por ende, un universo joven— los modelos se sienten inca-

paces de reproducir la distribución real de las galaxias.

La controversia sobre el valor de la constante de Hubble puede llegar a zanjarse con los datos que aporte el *Telescopio Espacial Hubble*, dotado de capacidad para resolver estrellas individuales a diez veces la distancia que puede alcanzarse desde el suelo. Proporciona, pues, la oportunidad de descubrir Cefeidas en un volumen de espacio mil veces mayor que el que rutinariamente exploran los telescopios instalados en tierra.

Prioridad del *Hubble* es descubrir Cefeidas en galaxias remotas, en el cúmulo de Virgo (a 50 millones de años luz), por ejemplo. Las Cefeidas servirían para determinar las distancias de tales galaxias, calibrando por tanto diversos indicadores de distancia secundarios. Tales observaciones mejorarían muchísimo las mediciones de la constante de Hubble.

Se nos concedió, a mi grupo y a otros, un tiempo de observación en el *Hubble* suficiente para localizar nuevas Cefeidas en galaxias más lejanas. Comenzamos nuestro rastreo, en 1991, por una galaxia cercana, la M81; identificamos más de 20 nuevas Cefeidas, obteniendo un conjunto espectacular de curvas de luz. Por desgracia, el telescopio no ha funcionado como se esperaba debido a la aberración esférica de su espejo primario, y ha tenido que retrasarse la mayor parte del programa hasta que la óptica se haya corregido, lo que por el momento está previsto para diciembre de 1993.

Contamos con razones poderosas para esperar que, a lo largo de los próximos diez años, se resuelva la controversia sobre la edad del universo y podamos trazar el curso de su evolución. De todas formas, la historia de la ciencia nos avisa que quedarán todavía muchos retos pendientes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAN DISCOVERS THE GALAXIES. R. Berendzen, R. Hart y D. Seeley. Science History Publications, 1976.

THE COSMOLOGICAL DISTANCE LADDER: DISTANCE AND TIME IN THE UNIVERSE. Michael Rowan-Robinson. W. H. Freedman and Company, 1985.

THE CEPHEID DISTANCE SCALE. Barry F. Madore y Wendy L. Freedman en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 103, n.º 667, páginas 933-957; septiembre de 1991.

LONELY HEARTS OF THE COSMOS: THE SCIENTIFIC QUEST FOR THE SECRET OF THE UNIVERSE. Dennis Overbye. Harper-Collins Publishers, 1991.

Limitaciones del soporte lógico

Al no poseer una fiabilidad absoluta, la función del ordenador podría verse limitada en sistemas cuya seguridad dependa de un soporte lógico

Bev Littlewood y Lorenzo Strigini

Raro es quien no ha sufrido algún error informático, ya sea una factura indebidamente cargada o la destrucción del trabajo de todo un día por culpa de un fallo misterioso en el ordenador. Tales inconvenientes, no pocas veces provocados por deficiencias —"chinches", en la jerga— de los programas no pasan de ser tropiezos triviales si se comparan con las consecuencias que pueden alcanzar los fallos informáticos en sistemas críticos. Fue un fallo de programación lo que incapacitó al sistema de misiles Patriot para el seguimiento e interceptación del Scud iraquí que costó la vida a 28 soldados estadounidenses durante la guerra del Golfo. A decir verdad, las deficiencias y averías de los logicales son, por lo común, mucho más insidiosas y difíciles de resolver que los defectos materiales de los equipos.

Nacen tales problemas de la complejidad de las tareas a realizar, que multiplica la probabilidad de persistencia de errores de diseño y posibilita que lleguen a manifestarse en el producto definitivo. La ingeniería tradicional ha dado pasos gigantescos hacia la comprensión y control de las averías materiales. Es cierto que aparecen en ocasiones deficiencias de diseño en equipos sin relación con la informática, pero su relativa simplicidad hace que la fiabilidad del diseño revista menor gravedad que en la confección de programas informáticos. Las preocupaciones aquí expresadas van mucho más allá de exóticos productos militares o aeroespaciales. Se les está encomendando a complejos programas el control de funciones críticas en equipos o sistemas de la vida corriente, caso de los sistemas de frenado sin bloqueo (ABS) de los automóviles, o de la dirección en los de guiado en las cuatro ruedas.

Examinamos aquí algunas de las principales causas que merman la fiabilidad de los logicales, sin olvidar que nuestra capacidad para medir tal fiabilidad es no pocas veces muy inferior a los niveles que serían necesarios. En ciertos sistemas críticos, como los sistemas de seguridad de las plantas químicas, es posible incluso que la única forma de garantizar el nivel de seguridad requerido consista en limitar el papel encomendado al soporte lógico informático.

Cabe, al menos en teoría, confeccionar programas impecables. Los programas, a diferencia de los materiales y las máquinas, no sufren desgaste. Todas las deficiencias de diseño se hallan presentes desde el momento mismo en que son cargados en el ordenador. Tales imperfecciones podrían, en principio, ser eliminadas de una vez y para siempre. Por otra parte, sería de desear que los informáticos pudieran demostrar matemáticamente la corrección de sus programas, y cabría esperar que así fuese.

Y, sin embargo, la ambición de conseguir programas perfectos sigue siendo una cima inaccesible. A pesar de haber sido ensayados rigurosa y sistemáticamente, la mayoría de los programas grandes contienen todavía chinches residuales. Ello se debe a la complejidad del código fuente. Un programa de apenas unos centenares de líneas puede contener decenas de

BEV LITTLEWOOD y LORENZO STRIGINI colaboran en el proyecto PDCS (dedicado a sistemas de cómputo predictiblemente fiables). Littlewood se doctoró en informática y estadística en la Universidad de Londres, donde dirige un centro sobre fiabilidad de la programación. Strigini, investigador del Centro de Proceso de Información (IEI) del Consejo Nacional de Investigación italiano (CNR), se formó en la Universidad de Pisa.



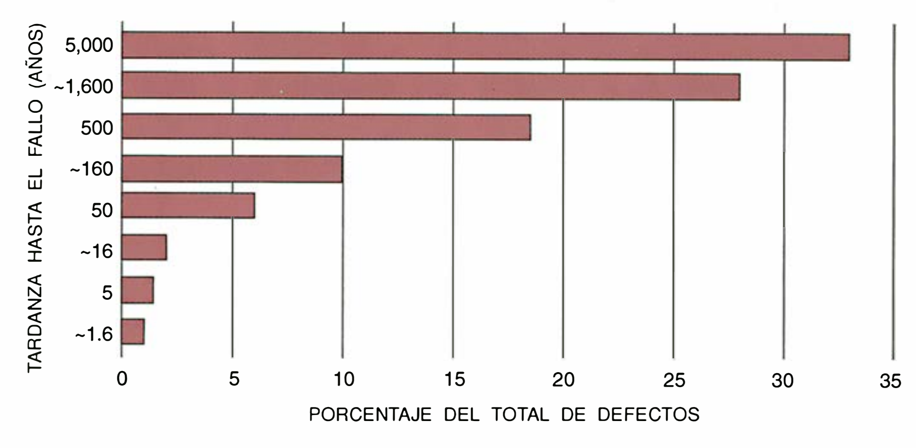
1. UN MISIL PATRIOT cruza el cielo de Tel Aviv para interceptar un Scud iraquí

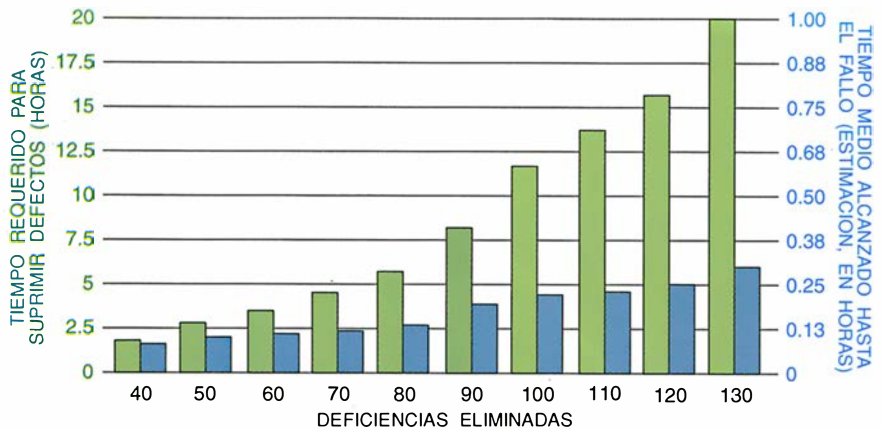
decisiones, lo que permite millares de distintas rutas de ejecución (los programas para aplicaciones críticas varían desde algunas decenas a millones de líneas de código). Los programas pueden tomar decisiones erróneas si no se tuvieron en cuenta, durante la fase de ensayo y verificación, las entradas concretas que provocan el error. La situación responsable de tales entradas pudo haber sido mal comprendida o, pura y simplemente, no haber sido prevista. En el primer caso, el diseñador programó "correctamente" una reacción a tal combinación de entradas, pero la reacción programada no era acertada; en el segundo, no se consideró tal combinación. Las chinches de este tipo son las más difíciles de erradicar.

Para empeorar las cosas, es corriente que durante el desarrollo del sistema se vayan alterando sus especificaciones, porque se modifica su finalidad o porque se comprende mejor el sistema. Las consecuencias de tales modificaciones pueden propagarse a todas las secciones del programa, tornando así inadecuado su diseño anterior. Además, el uso que realmente se le dé al sistema puede diferir del proyectado. Los fallos de los misiles Patriot en la interceptación de Scuds se han atribuido a una acumulación de pequeñas inexactitudes en la temporización interna de un ordenador. El ordenador estaba, sin embargo, funcionando en concordancia con sus especificaciones: se creía que el sistema se encendería y apagaría con tanta frecuencia que el error acumulado nunca podría alcanzar valores peli-



durante la guerra del Golfo, en 1991. Es posible que los programas de control del sistema de seguimiento del Patriot fallasen en algunas ocasiones, haciéndolos incapaces de localizar y destruir los Scuds que tenían por blanco.





2. HASTA LOS PROGRAMAS MAS DEPURADOS contienen imperfecciones. Edward N. Adams, de IBM, halló que los remanentes en un sistema eran "chinches quinquemilenarias", cada una de las cuales produciría un fallo tan sólo una vez cada 5000 años (*arriba*). Los defectos de esta naturaleza hacen que la depuración de programas obedezca a la ley de rendimientos decrecientes. Así, durante el ensayo de un sistema militar de comando y control (*abajo*) el tiempo de eliminación de los fallos empieza a rebasar con mucho las mejoras conseguidas en la fiabilidad estimada del sistema: el tiempo medio estimado hasta el fallo. Los diagramas de barras se han dibujado sobre escalas temporales distintas, por claridad.

grosos. Pero se utilizó el sistema de forma distinta a la proyectada y la minúscula inexactitud trocóse en problema serio.

También el comportamiento intrínseco de los sistemas digitales dificulta la creación de programas enteramente fiables. Muchos sistemas físicos son esencialmente continuos, en el sentido de que están descritos por funciones "de buena conducta", funciones "lisas" que, ante perturbaciones muy pequeñas de los estímulos, responden con modificaciones diminutas de las reacciones. En el caso de los ordenadores digitales, la mínima perturbación posible de su estado (el cambio de un bit, haciéndolo pasar, por ejemplo, de 0 a 1) puede provocar una modificación radical de la respuesta. Bastó un solo carácter incorrecto en la especificación de un programa de control del cohete Atlas, vector de la primera sonda interplanetaria estadounidense, la *Mariner 1*, para que se desviara del curso previsto. Cohete y nave tuvieron que ser destruidos al poco del lanzamiento.

En todas las demás ramas de la ingeniería existen dos criterios básicos para conseguir diseños de confianza, a saber, simplicidad de concepción y gradualidad en los cambios. Ahora bien, en ingeniería de programas, los niveles de novedad y versatilidad que consiente la programación son tan elevados, que los diseñadores sienten la tentación de abandonar dichos principios. Resulta posible diseñar con aparente facilidad aplicaciones enteramente nuevas, lo que proporciona un falso sentimiento de seguridad a quienes los desarrollan y a quienes los adquieren si no están familiarizados con los problemas específicos de la programación. La misma adición de nuevas funciones a programas bien probados puede provocar cambios inesperados en las funciones ya existentes.

Los problemas que suscita la inclusión de complejas reglas de decisión en sistemas discontinuos complejos y el pronóstico completo de su comportamiento no se dan únicamente en programación. Los proyectistas de complejos circuitos integrados digitales tropiezan con problemas similares. Ello no impide que la programación siga siendo el medio predominante para dar cuerpo a reglas de decisión especializadas y complejas en grado sumo. Además de los fallos que involuntariamente se cometen al programar un sistema, también pueden provocar comportamientos inaceptables los obstáculos introducidos deliberadamente para impedir su funcionamiento.

En vista de la imposibilidad práctica de conseguir un soporte lógico perfecto, ¿cómo decidir si los programas merecen la confianza que se va a depositar en ellos? Es preciso, ante todo, seleccionar con el mayor cuidado los condicionantes de tal seguridad para que reflejen la naturaleza de la aplicación. Los requisitos exigidos al sistema varían de una aplicación a otra. Por ejemplo, la Administración estadounidense exige que su nuevo sistema de control de tráfico aéreo no pueda hallarse fuera de servicio más de tres segundos al año, en total. En los aviones de pasaje civil, la probabilidad de ciertas averías catastróficas no puede ser mayor que 10^{-9} por cada hora.

Al establecer las exigencias de fiabilidad para ordenadores hemos de tomar en consideración cualesquiera beneficios extra que el ordenador pueda producir, porque la no utilización de un sistema determinado puede a su vez infligir un daño. Por ejemplo, los aviones militares son por necesidad mucho más peligrosos de pilotar que los civiles. Para conseguir la supervivencia en combate se requieren prestaciones muy elevadas, lo que veta el recurso a soluciones tradicionales. Por esta razón, un sistema informático nuevo puede mejorar la capacidad de supervivencia de un avión a pesar de ser menos seguro que los ordenadores utilizados en aparatos comerciales.

Análogamente, en el diseño de aviones civiles muy informatizados, como el Airbus A320 y el Boeing 777, es preciso sopesar la posibilidad de que la programación provoque accidentes con la posibilidad de que los programas ahorren desgracias causadas por error del piloto o averías de los equipos.

Estamos convencidos de que exis-

ten serias limitaciones a los niveles de confianza que podemos justificadamente otorgar a la fiabilidad de los logicales. Para explicar este punto de vista es preciso examinar las diversas fuentes de pruebas que respaldan la confianza en la programación. La más obvia es la verificación experimental: se hacen funcionar los programas, observando directamente su comportamiento y depurándolos cada vez que aparece una deficiencia. La fiabilidad de los programas irá creciendo en tal proceso y los datos recogidos pueden aprovecharse para obtener medidas precisas de la fiabilidad alcanzada por el programa, merced a técnicas muy refinadas de extrapolación estadística.

Desdichadamente, esta técnica sólo funciona cuando las exigencias de fiabilidad son bastante modestas (un fallo cada varios años, pongamos por caso) frente a los niveles de seguridad exigidos para aplicaciones críticas. Para alcanzar una confianza de no más de 10^{-9} fallos por hora tendríamos que ejecutar el programa durante muchísimos múltiplos de 10^9 horas, de 100.000 años. Claramente, es imposible acometer así la tarea. Y en los tiempos reales que cabe dedicar a ensayos, las garantías de seguridad caerían muy por bajo de lo necesario.

El problema da buena muestra de la ley de rendimientos decrecientes. Si perseveramos durante muchísimo tiempo en la depuración de un programa, acabamos descubriendo chinches tan pequeñas que su enmienda no incide en la fiabilidad o seguridad del sistema global. Edward N. Adams, de IBM, analizó empíricamente los "tamaños de las chinches" en una base de datos de cobertura mundial, que suponía el equivalente de miles de años de uso de un sistema informático particular.

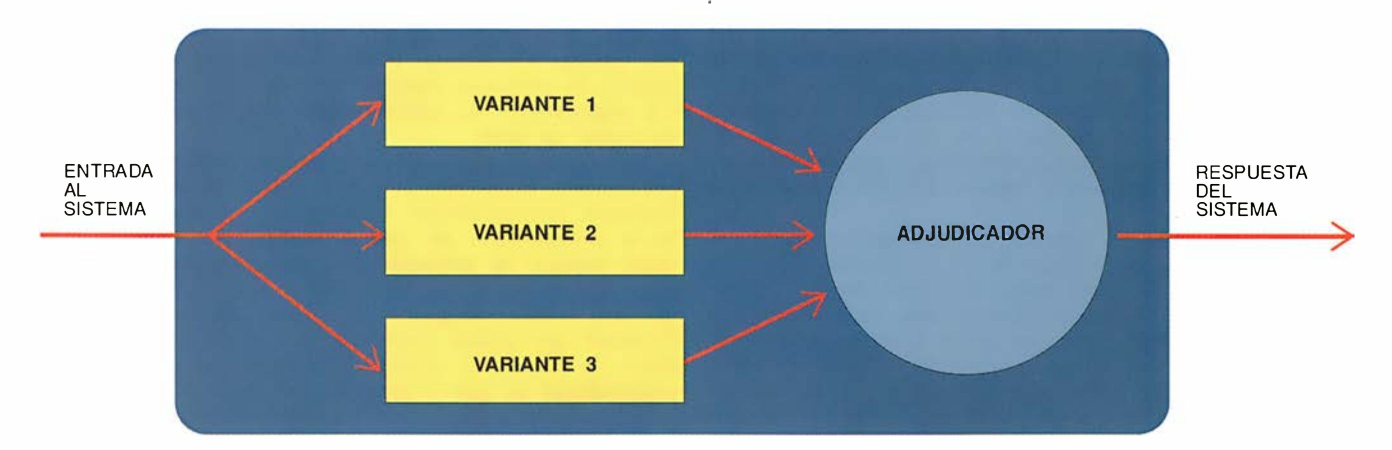
El descubrimiento más extraordinario consistió en que alrededor de la tercera parte de las chinches eran "quinquemilenarias": cada una de ellas provocaba un fallo más o menos una vez cada 5000 años de ejecución (las frecuencias de aparición de otros defectos variaban en algunos órdenes de magnitud). Estas "máculas" excepcionales sumaban una porción considerable del total de los fallos, pues las responsables de tasas de fallos más elevadas habían sido descubiertas y consiguientemente eliminadas mucho antes. Al cabo, únicamente los fallos quinquemilenarios serían los responsables de mal funcionamiento del sistema; el incremento de fiabilidad correspondiente a la eliminación de uno de ellos sería despreciable.

La extrapolación efectuada a partir de ensayos y depuración entraña una hipótesis tácita, a saber, que, descubierta una chinche, su eliminación es cosa sencilla. La verdad es que las tentativas de depuración fracasan en ocasiones. Puede incluso que la enmienda introduzca un nuevo fallo. Dado que nada sabemos acerca de tal fallo, cabe que sus efectos sobre la fiabilidad del sistema sean ilimitados. En particular, pudiera suceder que el sistema fuese menos fiable tras la enmienda que antes de subsanar el fallo.

En consecuencia, sería prudente no tener en cuenta para nada la historia anterior al último fallo. Esta precaución, de importancia crítica cuando ha de primar la seguridad, exigiría que el evaluador, tras cada enmienda, diese al programa enmendado el mismo tratamiento que si fuese nuevo del todo; al juzgar la seguridad del programa únicamente debería pesar el período más reciente de funcionamiento impecable. Pero ni siquiera un proceder tan conservador puede garantizar mucha confianza. Nuestra investigación ha demostrado que, con hipótesis matemáticas francamente plausibles, la probabilidad de que el programa funcione sin error durante otro período igual ronda tan sólo en torno al 50 por ciento.

La verdad es que el problema de la estimación de la seguridad es todavía más serio. Para conceder alguna confianza a los resultados numéricos hemos de someter al programa a situaciones que pudiera encontrar en la realidad. Tal proceder trata de asegurar que la frecuencia de aparición de entradas que provocan fallos corresponde a la que se daría durante el funcionamiento real. Por otra parte, las personas o equipos que efectúan los ensayos habrían de poder establecer en todos los casos si la salida del programa es correcta. Los problemas son, en este caso, similares a los de proyectar y llevar a la práctica la programación propiamente dicha. Para construir un ambiente de ensayo de suficiente precisión, hemos de tener la certeza de haber considerado todas las circunstancias con las que se van a encontrar los programas. Así como en el diseño de sistemas es lo inesperado lo que suele vencernos, otro tanto ocurre en el diseño de ensayos. Sería prudente mantener cierto escepticismo sobre la representatividad de los ensayos y, consiguientemente, sobre la exactitud de las cifras.

El problema que se presenta al querer dejar manifiesta la extrema fiabilidad de un programa cualquiera



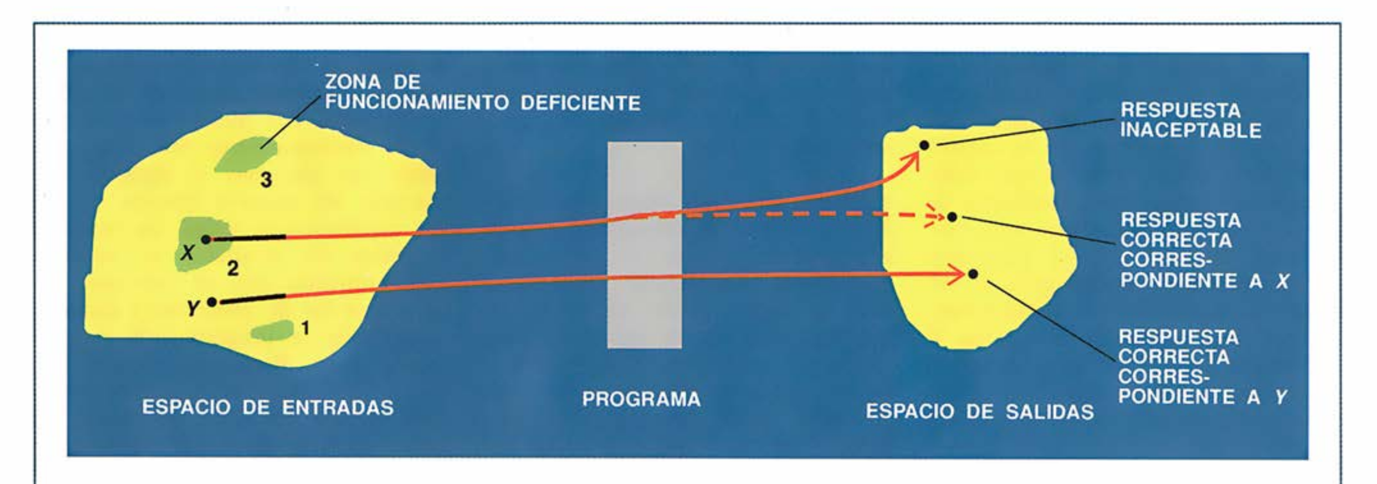
3. LA DIVERSIDAD DE DISEÑOS contribuye a aumentar la fiabilidad de un mismo sistema de programas. Cada versión del programa es desarrollada por equipos de diseño independientes. El "adjudicador" (*derecha*) decide cuál será la verdadera respuesta del sistema, apoyándose, por ejemplo, en el valor medio de los generados por las variantes o el "votado favorablemente" por la mayoría. El adjudicador podría ser otro sistema redundante y no recurrir a la tecnología informática; tal es el caso, por ejemplo, de los actuadores hidráulicos. (Esquema de los autores.)

reside en nuestra propia ignorancia. En el caso de sistemas informáticos complejos, la verdad pura y dura es, según parece, que la confianza que podemos atribuir a los programas está seriamente limitada. La mera observación de la conducta del soporte lógico no garantiza que vaya a funcionar debidamente durante 100.000 años. ¿De qué otra forma podríamos lograr tal confianza?

Una condición previa y evidente para la consecución de elevada fiabilidad consiste en que la programación sea construida por métodos idóneos para generar fiabilidad, al menos en principio. Uno de tales métodos recurrre a técnicas "formales", fundadas en técnicas matemáticas para garantizar el funcionamiento especificado de los programas. A decir verdad, las técnicas formales se han tornado en tema de gran interés, porque, aunque su aplicabilidad hállase limitada por dificultades de índole práctica, pueden evitar eficazmente los errores de programación que se producen en la traducción de las especificaciones a un programa real.

Pero las especificaciones han de consistir también en enunciados formales. Dicho de otro modo, será preciso expresar las necesidades del usuario en un lenguaje matemático. No es tarea sencilla. Hay que seleccionar los aspectos del mundo real que deben ser descritos en lenguaje formal, acompañados de una comprensión profunda de los problemas prácticos de detalle, y sumar a todo ello el conocimiento del lenguaje formal. No es inverosímil que durante este proceso lleguen a infiltrarse errores; no se podría proclamar que el programa no fallará jamás.

Otro método para conseguir elevada fiabilidad (de amplio uso en aviónica y control de tráfico ferroviario) es el denominado "tolerancia ante fallos", o "redundancia protectora." Una forma típica de aplicación de



Naturaleza del fallo informático

Los fallos de la programación no son descriptibles en términos puramente determinísticos. En opinión de los autores, la descripción de los errores de programación exige un tratamiento probabilístico, exactamente igual que nos valemos de estadísticas para describir con qué frecuencia fallan, en promedio, los dispositivos eléctricos o mecánicos.

Para comprender la razón, consideremos la totalidad de las posibles entradas (el denominado espacio de entradas) que pudiera encontrar el programa durante su vida (*arriba*). Una entrada para una operación del programa consiste en un conjunto de datos digitales (números) procedentes de lecturas tomadas del mundo exterior y de información ya almacenada en la memoria del ordenador. En la figura se ofrece el espacio de entradas en las dos dimensiones que consiente la página, pero en la práctica el número de dimensiones sería mucho mayor.

En este caso, el espacio de entrada contiene tres zonas de fallos, numeradas de 1 a 3. La entrada *x* yace en la zona de funcionamiento deficiente número 2; provocaría que el programa generase una respuesta inaceptable. El programa, por otra parte, ejecuta con éxito la entrada *y*, no ubicada en ninguna de las zonas de fallo.

Los programas se ensayan ejecutándolos con muchas entradas y verificando en cada caso si los resultados son correctos. Si durante los ensayos se produce una respuesta correcta, también la producirá cada vez que le sea presentada la misma entrada. En la mayoría de los programas, el ensayo exhaustivo de todas las entradas exigiría billones de años; de aquí la necesidad de inferir la probabilidad de fallo a partir de los ensayos efectuados con una muestra de posibles entradas.

Quisiéramos saber cuándo se producirá el próximo fallo del programa, pero ello no es posible, por la incertidumbre inherente del proceso. Su incertidumbre nace, en primer lugar, de los mecanismos físicos que determinan la sucesión de entradas (trayectoria en el espacio de entradas). Nunca podemos estar seguros de cuáles serán las entradas seleccionadas en el futuro; diferentes entradas tienen distintas probabilidades de resultar elegidas. En segundo lugar, no tenemos certeza del tamaño y ubicación de las regiones de fallo en el espacio de entradas. Aunque conociéramos la trayectoria, seguiríamos sin saber cuándo iba el programa a encontrar un fallo.

Por consiguiente, la opinión que nos merezca el comportamiento futuro del programa habrá de ser descrita mediante probabilidades. Podríamos preguntarnos cuál es la probabilidad de que lleguemos a sobrevivir a cierto número de entradas concretas antes de llegar al fallo. O podríamos preguntar cuál es la probabilidad de que una entrada elegida al azar provoque un fallo. Es frecuente que ambas cuestiones se transformen en medidas de fiabilidad referida a tiempos, esto es, a la probabilidad de que el programa exhiba una ejecución perfecta durante un período temporal predeterminado.

En conclusión, nos vemos obligados a considerar que el proceso de sucesivos fallos del programa es tan aleatorio como el de un elemento de un dispositivo material. Resulta entonces inevitable el recurso a medidas de fiabilidad de base probabilística.

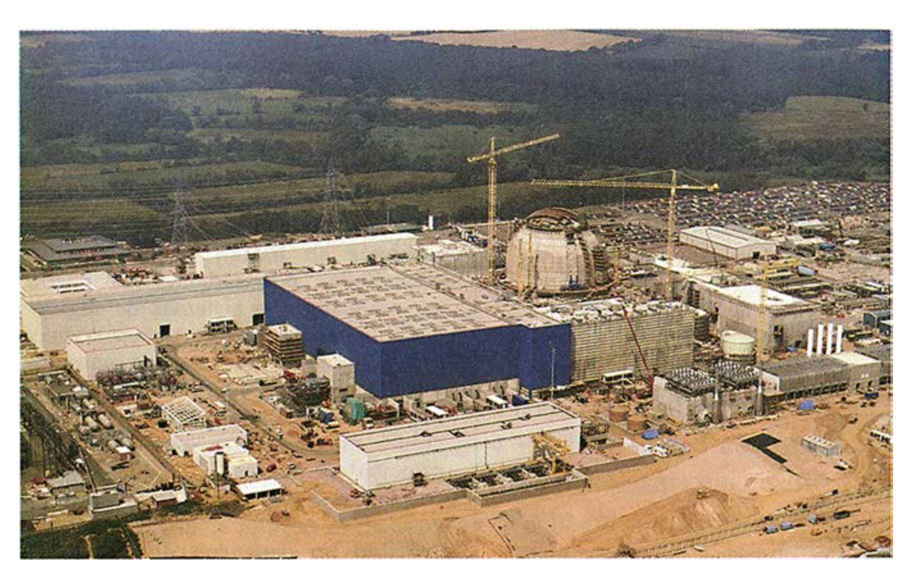
redundancia consiste en hacer que varios equipos de diseño preparen independientemente sendas versiones del programa, con la esperanza de que, si los equipos cometen errores, los errores de unos y otros sean diferentes. Cada variante del programa emite su "opinión" sobre cuál habría de ser la salida correcta. Las salidas pasan a una fase de adjudicación, la cual produce una salida única que sería correcta si la mayoría de las versiones diesen el resultado correcto.

Existen indicios de que tal diversidad de diseños genera alta fiabilidad a coste reducido. Sin embargo, es posible que diferentes equipos de diseño cometan los mismos errores (debido quizás a elementos comunes de su trasfondo cultural) o que incurran en errores conceptualmente diferentes, responsables, por azar, de que las diversas versiones fallen en el mismo lugar. El adjudicador producirá en tal caso una salida incorrecta.

Para medir la fiabilidad de la programación redundante es preciso estimar la correlación estadística entre los fallos de las diferentes versiones. Por desgracia, tal empresa resulta de igual dificultad que la medición de la fiabilidad cuando el sistema entero es considerado como una sola entidad, y hemos visto ya la dificultad que ello comporta.

Así pues, si las demostraciones formales no permiten afirmar que un programa no fallará jamás, y si la protección por redundancia tampoco puede garantizar la fiabilidad, no parece existir más alternativa que la evaluación directa de la fiabilidad, utilizando métodos cuya limitada precisión es bien reconocida. ¿Cómo actúan las autoridades reguladoras y los usuarios del soporte lógicos ante tal incertidumbre?

Tres son los enfoques adoptados. El primero clasifica los fallos de diseño como errores "no cuantificables" y evita especificar requisitos para la programación. Este método goza de bastante aceptación. Ciertas normativas de aviación civil estipulan, por ejemplo, que las situaciones de fallo catastrófico han de ser tan improbables que no pueda presumirse que acontezcan ni una vez durante el período entero de vida operacional de todos los aeroplanos de un mismo tipo. La expresión cuantitativa sugerida es una probabilidad de fallo no mayor que 10^{-9} por hora de vuelo. Sin embargo, la programación ha sido explícitamente excluida, porque no es factible evaluar el número de errores o las categorías de error informático, si alguno, que puedan subsistir una vez completado el diseño, desarrollo y ensayo del sistema.



4. SIZEWELL B será el primer reactor nuclear del Reino Unido que contendrá sistemas de protección tanto convencionales como informáticos para el caso de cierres de emergencia. Los críticos aducen que la complejidad del sistema informático, que se basa en centenares de microprocesadores y en más de 100.000 líneas de programa, torna muy difícil garantizar la seguridad del reactor.

Las directrices dadas para los fabricantes que hayan de obtener certificaciones de las autoridades de aviación suelen rehusar explícitamente la estipulación de términos cuantitativos o de métodos para la evaluación de la fiabilidad o seguridad de los soportes lógicos. Un enfoque ingenieril correcto —gestión estricta, revisiones y ensayos concienzudos, análisis de errores anteriores— resulta más crítico que los métodos cuantitativos. De lo que se trata es de que los diseñadores adopten en la programación métodos sistemáticos y disciplinados: definición clara de objetivos, diseños, desarrollos, ensayos, gestión de la configuración y documentación. Es decir, la mejor garantía de fiabilidad parece consistir en asegurar que se han tomado las máximas precauciones durante el diseño.

¿Qué calidad es la de tal garantía? Se puede oponer que no muy grande. No existen pruebas de que, al aplicar los más esmerados métodos de diseño y producción, se obtengan sistemáticamente productos superiores. Ni siquiera tenemos la certeza de que los mejores métodos disponibles lleguen a producir fiabilidad suficiente en las aplicaciones más estrictas.

Prescindir de la cuantificación de la seguridad de la programación entraña una limitación grave para muchos sistemas potencialmente peligrosos, sobre todo en los que requieren una evaluación probabilística global antes de entrar en servicio. Cabe predecir con exactitud razonable los fallos de material provocados por fatiga y desgaste. Pero tal exactitud no es utilizable en las tentativas de evaluación del riesgo de que el sistema entero (es decir, los equipos materiales más los programas o logicales) llegue a fallar, si todo cuanto podemos decir es que se puso el máximo empeño en evitar errores. Para resolver el problema no basta con imponer y exigir "los mejores métodos". Nos apresuramos a añadir que sería absurdo abandonar técnicas que sabemos que mejoran la fiabilidad y la seguridad, sólo porque ignoramos la cuantificación exacta de tal mejoría. No hay duda de que las normas que incentivan su aplicación son beneficiosas. Pero no resuelven el problema de saber con certeza que la programación posee la seguridad requerida.

El segundo método —superior, a nuestro juicio— consistiría en exigir que, en el diseño del sistema, no se le asignase a la programación un papel excesivamente crítico. "No excesivamente crítico" significa en este caso que la fiabilidad demandada a la programación sea bastante modesta, al objeto de que tal fiabilidad pueda quedar demostrada antes del despliegue o instalación del sistema. Este ha sido el método adoptado para el nuevo reactor nuclear Sizewell B, en el Reino Unido, para el

cual sólo se le ha exigido al sistema informático de protección que la probabilidad de fallo ante cualquier emergencia no exceda de 10^{-4}.

Se dispone de métodos comprobados para limitar la naturaleza crítica de cualquier componente. Por ejemplo, una planta industrial cuyas operaciones se hallen primariamente controladas por ordenadores puede ser equipada con sistemas de seguridad que no dependan de programas informáticos ni de diseños complejos. De ordinario, los sistemas de respaldo o de seguridad realizan funciones más sencillas que el sistema principal de control, lo cual permite construirlos más fiablemente. La seguridad es posible si los sistemas de respaldo no dependen de los sistemas principales. Su construcción podría basarse en tecnologías de otra naturaleza y servirse de fuentes energéticas, sensores y actuadores propios. En tal caso, la probabilidad de que los sistemas primario y de respaldo (o seguridad) fallen simultáneamente puede con justicia ser tenida por pequeña.

El tercer método consiste en aceptar las actuales limitaciones que padece la programación y conformarnos con una seguridad global más modesta del sistema. Después de todo, la sociedad exige en ocasiones niveles de seguridad extraordinariamente elevados por motivos que pudieran ser irracionales. Tenemos un buen ejemplo en los actos médicos. Es sabido que la tasa de fallos en cirugía es elevada; podría parecer natural aceptar una alternativa computarizada si pudiera demostrarse que el nuevo sistema es un poco superior, o incluso igual, que el médico humano. De hecho, es probable que en un futuro no lejano sean cirujanos robóticos quienes realicen operaciones que rebasan la capacidad de los humanos.

Los tres métodos de regulación de la seguridad de los programas pueden parecer decepcionantes. Cada uno de ellos impone límites ora sobre el nivel de seguridad del sistema, ora sobre la complejidad del programa. Es posible que la única forma de saber más sobre las imprescindibles transacciones entre seguridad y complejidad consista en estudiar los fallos (o su inexistencia) de la programación durante su funcionamiento.

Lamentablemente, se carece de datos con los que elaborar predicciones estadísticas. La información sobre fallos informáticos rara vez se hace pública. Las compañías temen que al comunicar tal conocimiento resulte perjudicada su capacidad competitiva. Y todavía les preocupa más que, al publicarla, hayan de enfrentarse a la opinión pública. El público general tal vez considerase que la detección de fallos informáticos es indicativa de normas de producción poco estrictas, en lugar de entender que tal vez esté atestiguando la aplicación de métodos muy concienzudos para la producción de programas de muy elevada calidad. Por otra parte, el sigilo al respecto sólo servirá para hacer pensar que las expectativas de seguridad pueden elevarse hasta niveles menos y menos verosímiles.

Cualquiera que fuese el procedimiento para obtenerlos, una amplia colección de datos acabaría con el tiempo ayudando a cuantificar la eficacia de distintas técnicas de producción y validación. Tal información contribuiría a establecer reglas más realistas de calibración de la fiabilidad de los sistemas informáticos. Así pues, para soportes lógicos que no hayan sido objeto de ensayos estadísticos completos, las declaraciones aceptables de seguridad podrían ser ligadas a cotas superiores explícitas, que serían función de la complejidad del programa. Tal proceder podría consentirnos la justificación de declaraciones de fiabilidad y seguridad en los soportes lógicos que rebasan con mucho lo que hoy es verosímil.

En el ínterin hemos de recelar de toda afirmación de fiabilidad que nos parezca exagerada. Habida cuenta de los niveles de complejidad que la programación ha posibilitado, estamos convencidos de que el escepticismo es la mejor de las opciones.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

EVALUATION OF SAFETY-CRITICAL SOFTWARE. David L. Parnas, A. John van Schouwen y Shu Po Kwan, en *Communications of the ACM*, vol. 33, n.º 6, páginas 636-648; junio de 1990.

SOFTWARE SAFETY IN EMBEDDED COMPUTER SYSTEMS. Nancy G. Leveson, *Communications of the ACM*, vol. 34, n.º 2, páginas 34-36; febrero de 1991.

FORUM ON RISKS TO THE PUBLIC IN COMPUTERS AND RELATED SYSTEMS. Moderador, Peter Neumann. Disponible como fichero usenet comp.risks, o por solicitud en internet a risks-requests@ csl.sri.com.

RISKS TO THE PUBLIC IN COMPUTERS AND RELATED SYSTEMS. Sección fija a cargo de Peter Neumann en *Communications of the ACM*.

John Horgan

KARL R. POPPER: *debate crítico con la inteligencia*

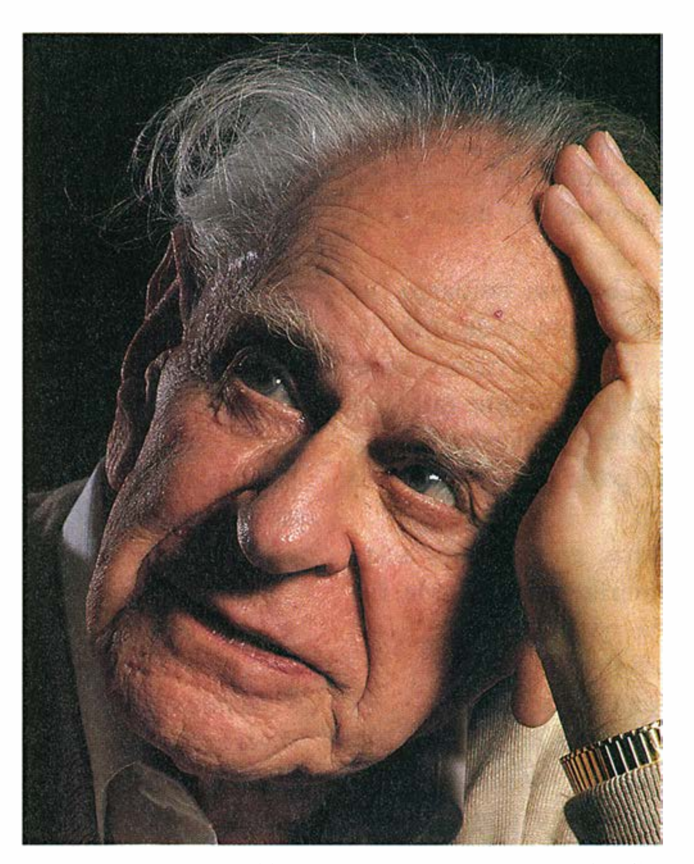
Trato de sobreponerme. Estoy nervioso porque, dentro de muy poco, entrevistaré al filósofo Karl R. Popper, quien es, con mucho, el pensador más influyente entre los científicos, si no entre los demás filósofos. Se le conoce, sobre todo, por haber establecido que las teorías científicas nunca pueden demostrarse en los ensayos experimentales; tan sólo pueden refutarse o "falsarse". En innumerables artículos y en más de una docena de libros se ha ocupado también de mecánica cuántica, determinismo, teoría de la evolución, totalitarismo político y casi cualquier otro asunto que encerrara algún interés.

Encorvado y llamativamente bajo, se mueve, sin embargo, con la ligereza de un peso pluma. Blande un artículo que escribí yo para *Investigación y Ciencia* sobre el abandono de la noción de las partículas subatómicas entendidas como entidades objetivas que en algunos físicos ha provocado la mecánica cuántica. "No me creo ni una palabra de esto", declara con acento vienés. "Subjetivismo" es un término que no tiene cabida en física, cuántica o no, asevera. "La física", exclama, tomando un libro de una mesa y dejándolo caer, "¡es eso!"

Una vez ha tomado asiento, se remueve una y otra vez en busca de libros o artículos que refuercen su opinión. Esforzándose por sacar a la luz una fecha de su memoria, se acaricia sus sienes y cobra una expresión como de agonía. En cierto momento, cuando la palabra "mutación" se le escapa de los labios, se da una sonora palmada en la frente y alza la voz: "¡Términos, términos, términos!"

Durante una de esas breves pausas para recuperar el aliento, le menciono su tesis archifamosa según la cual toda teoría ha de ser falsable si quiere obtener el estatuto de ciencia. ¿Es falsable, le pregunto, esta teoría de la falsabilidad? Popper pone su mano sobre la mía y me traspasa con una sonrisa radiante. "No quiero herirle", me dice, suavizando su voz, "pero ésa es una pregunta tonta".

Todavía sonriendo, aclara que "la función de la falsabilidad es la de aseverar si una teoría es o no científica. Mi teoría de la falsabilidad es ciertamente no científica. Pertenece a la metaciencia".



KARL R. POPPER, filósofo de origen austríaco, ha fustigado el dogmatismo tanto en ciencia como en política durante toda su carrera.

Me lo debería haber pensado mejor antes de intentar poner en un brete a Karl Popper. Durante más de 70 años, ha participado en el debate de los principales problemas de la ciencia de nuestro siglo con las mejores cabezas. Y la crítica, después de todo, no es sino el credo de Popper. Considera la crítica, e incluso el conflicto, como algo esencial para el progreso. Lo mismo que los científicos se aproximan a la verdad a través de "conjeturas y refutaciones", así las especies evolucionan a través de la competición y la sociedad gracias al debate político. Una "sociedad humana sin conflictos", escribió una vez, "no sería una sociedad de amigos sino de hormigas".

Popper fue criado en Viena en un ambiente familiar intelectual; su padre era profesor de derecho y su madre una música de cierta categoría. Remonta los inicios de su filosofía, que llama racionalismo crítico, a cuando tenía 17 años. Tras un breve devaneo con el comunismo, quedó asqueado del dogmatismo de los marxistas, de su completa certeza de que Marx "tenía razón". Aproximadamente al mismo tiempo, se enteró de que las observaciones de un reciente eclipse solar habían confirmado la predicción de una extraña teoría de la gravedad propuesta por un joven físico de nombre Albert Einstein.

El contraste le llevó a Popper a preguntarse: ¿Qué distingue exactamente a las teorías pseudocientíficas, como el marxismo o la astrología o incluso el psicoanálisis, de las científicas, así la teoría de la relatividad de Einstein? La respuesta, decidió, es que las últimas ofrecen predicciones suficientemente específicas como para ser comprobadas experimentalmente y, por tanto, falsadas.

En aquel tiempo, la filosofía de la ciencia estaba dominada por el positivismo lógico, de acuerdo con el cual los científicos pueden inferir lógicamente ciertas verdades limitadas sobre el mundo a través de repetidas observaciones empíricas. Popper coincidía con los positivistas en que una teoría puede ser verdadera, pero

refutaba su aserto de que podamos llegar a *saber* que es verdadera. "Debemos distinguir entre verdad", dice, "que es objetiva y absoluta, y certeza, que es subjetiva".

Además, según Popper, la ciencia no puede reducirse a un sistema o método lógico y formal, como sugerían los positivistas. Una teoría es una invención, un acto de creación, basada más en la intuición del científico que en los datos empíricos preexistentes.

Pero si la ciencia es una empresa creativa, el mundo debe revelarse de manera fundamentalmente impredecible. Al reconocer este hecho, Popper ha emprendido una lucha a muerte con el determinismo. "El determinismo significa que, sabiendo suficiente física o química, podemos predecir lo que Mozart compondrá mañana. Y ésa es una hipótesis ridícula."

Popper ya se había dado cuenta antes de que la mecánica cuántica pone en la picota el determinismo al reemplazar la certeza clásica por la "propensión". Más aún: los propios sistemas clásicos son de suyo impredecibles, fenómeno que se arroga haber descubierto mucho antes que los modernos teóricos del caos. En 1950 encontró un teorema de un matemático francés del siglo XIX que demostraba que, en cierta superficie bidimensional, se podían conectar dos puntos mediante infinitas geodésicas, o caminos más cortos. Este teorema demostraba que "el mundo es caótico", afirma.

Popper articuló sus ideas en 1934 en el que sigue siendo su libro más famoso: *La lógica de la investigación científica*. Fue tan bien recibido que, en 1936, el entonces profesor de instituto fue invitado a ocupar una plaza de docente en filosofía en el Colegio Universitario de Canterbury, Nueva Zelanda. Tras librarse de la segunda guerra mundial en los antípodas, pasó a la Escuela de Economía y Ciencias Políticas de Londres, en la que continúa, ahora en calidad de profesor emérito.

Las ideas de Popper, más que las de cualquier otro filósofo, han sido cálidamente acogidas por los científicos, y por los físicos en particular. El físico británico Hermann Bondi alababa recientemente en *Nature* su filosofía calificándola de "crisol donde todavía podemos someter a prueba si una idea es o no significativa desde el punto de vista científico". Una admiración mutua. Popper sigue recordándome que tuvo un trato personal con gigantes de la talla de Einstein, Schrödinger y Bohr. "Le conocía bastante bien", dice de Bohr. "Era un físico maravilloso, uno de los más grandes de todos los tiempos, pero un filósofo paupérrimo."

No se ha llevado muy bien con sus colegas filósofos, de cualquier estirpe. Su libro *La sociedad abierta y sus enemigos*, publicado en 1945, enervó a los filósofos políticos de todas las tendencias con sus ataques a Platón, Marx, Hegel y a otros a los que acusó de dogmatismo político. La política, más incluso que la ciencia, necesita de la libre circulación de ideas y críticas. El dogmatismo conduce inevitablemente no a la utopía, como claman tanto marxistas como fascistas, sino a la represión totalitaria. (Algunos alumnos de Popper, al darse cuenta de su propio talante autoritario, se referían al libro como *La sociedad abierta, por uno de sus enemigos*.)

Popper también pleitea contra los

"Muchos filósofos están deprimidos profundamente porque no pueden producir nada que valga la pena"

filósofos de la posguerra que reducían la filosofía a mera lingüística y juegos de tautología. En su autobiografía intelectual, *Búsqueda sin término*, recuerda su legendario duelo con uno de los progenitores de esa escuela, Ludwig Wittgenstein. Estaba dando una conferencia en Cambridge en 1946, cuando Wittgenstein le interrumpió para proclamar la "inexistencia de problemas filosóficos". A lo que replicó que sí había, y muchos, por ejemplo el de establecer las bases de las reglas morales. Wittgenstein, que estaba jugando nerviosamente con el atizador de la chimenea, arremetió con él contra Popper: "¡Déme un ejemplo de regla moral!" Al responderle Popper "No amenazar a los profesores visitantes con el atizador", Wittgenstein abandonó furioso la estancia.

Le repele la opinión popular de una ciencia manejada más por la política y los usos sociales que por la búsqueda racional de la verdad. Culpa de esta actitud a una conjura de los estudiosos de las ciencias sociales para alterar el tradicional orden jerárquico de la ciencia, según el cual la física es la más legitimada y las ciencias sociales las menos.

Pero también los científicos pueden no dar la talla para el ideal de Popper. Las subvenciones públicas a la ciencia, cada vez mayores han desembocado en "una cierta corrupción", dice. "Los científicos no son tan críticos como debieran. Existe un cierto deseo que la gente como usted" —apunta con su dedo a mi pecho— "lo debería poner frente al público".

Popper está particularmente decepcionado por el modo en que los cosmólogos se aferran a la teoría de la gran explosión y "pisotean" las alternativas. Quedó sobrecogido por el modelo expansionario del universo cuando fue presentado en su forma más simple hace más de medio siglo. "Pero luego vinieron las dificultades, y se necesitaban una retahíla de hipótesis adicionales", dice. Hoy, añade, "la actitud crítica en este campo es muy escasa".

Irritó en el pasado a los biólogos cuando sugirió que la teoría de la evolución de Darwin era imposible de comprobar, si no tautológica (los supervivientes sobreviven), de manera que carecía de valor científico. Ahora se muestra reacio a volver sobre la cuestión. Aunque le pregunto varias veces por su postura actual, dice sólo que puede que haya ido "un poquito lejos" en sus críticas.

En vez de hablar sobre el darwinismo, Popper torna en reiteradas ocasiones hacia una teoría singular del origen de la vida avanzada por Günter Wächtershäuser, un abogado de patentes de Munich que tiene un doctorado en química. Wächtershäuser propone que la vida no empezó con la replicación de unidades biológicas, digamos el ARN, según aceptan muchos biólogos modernos, sino con un proceso bioquímico parecido al ciclo energético de Krebs en las células. ("Yo conocí a Krebs", apunta Popper.)

Siente una especie de orgullo de paternidad hacia la nueva teoría; Wächtershäuser la desarrolló con el aliento de Popper tras asistir a un curso de verano suyo. Pero pone de relieve que ni él ni Wächtershäuser se han aferrado a la idea. "Por el amor de Dios, ¿por qué no habría de existir una tercera alternativa?"

La asistenta de Popper asoma su cabeza por la puerta para preguntar, entre gruñona y cortante, cuándo vamos a acabar. Hemos estado hablando cerca de tres horas. Le digo que sólo me queda la última cuestión: ¿Por qué, en su autobiografía, se llama a sí mismo "el filósofo más feliz que conozco"? Esboza una sonrisa maliciosa. "Muchos filósofos están deprimidos profundamente porque no pueden producir nada que valga la pena", replica.

Ciencia y sociedad

La educación secundaria en Europa

¿Transición o cambio?

Históricamente, la educación secundaria no nace como el necesario complemento de una educación primaria generalizada, sino como antesala de la educación universitaria. Sólo desde esta perspectiva pueden comprenderse muchos de sus rasgos característicos. Así, la mayor compartimentación de los conocimientos que transmite, que reflejan los del nivel universitario. La cualificación de los profesores es también distinta: lo importante ahora es que sean licenciados universitarios en las disciplinas correspondientes; su formación profesional como docentes suele reducirse en toda Europa a unos breves cursos de capacitación pedagógica. Por otro lado, comienzan a perfilarse los variados intereses de los alumnos y a ponerse de manifiesto sus capacidades diversas, con lo que se inicia su proceso de clasificación académica. Tantos y tan profundos cambios respecto al nivel primario hacen que el paso de uno a otro se viva por los alumnos como una importante discontinuidad.

La tendencia a la ampliación de los mínimos aceptables para la educación obligatoria, que no puede considerarse concluida con la primaria, distorsiona esta particular relación de dependencia entre la educación secundaria y la universidad, convirtiendo esta etapa en piedra de toque de la democratización del sistema educativo. La cuestión es: ¿deben recibir todos los alumnos el mismo tipo de educación secundaria?

Simplificando mucho, podría decirse que quienes están de acuerdo con la diferenciación y la segregación adoptan una justificación pedagógica: son las propias capacidades y aptitudes del alumno las que determinan si podrá o no seguir con éxito la enseñanza secundaria, preparatoria para el acceso a la educación superior. Quien no cuente con esas capacidades debe emprender inicialmente otro camino, el de la formación profesional, con unos objetivos y contenidos mucho más asequibles para todos; por lo demás, el acceso a la educación superior no queda definitivamente cerrado, al existir mecanismos de transferencia tras la adecuada preparación.

Desde otra perspectiva, los partidarios de la no segregación y, por tanto, de la escuela integrada, utilizan una argumentación eminentemente social: si hay un período de obligatoriedad escolar —que en Europa incluye toda o gran parte de la educación secundaria— se supone que es en razón de la necesidad de que todos los alumnos alcancen unos mismos objetivos, aquellos imprescindibles para una correcta inserción social. Los problemas derivados de la multiplicidad de intereses, necesidades y capacidades deben encontrar soluciones pedagógicas, que no impliquen la asistencia a distintas instituciones ni la fijación de diferentes objetivos, puesto que ello se traduce en una jerarquización de importantes consecuencias sociales. Es más, algunas de las diferencias aptitudinales utilizadas para segregar a los alumnos en grupos tienen un origen social y económico, que el proceso educativo debe tratar de contrarrestar.

El resultado de estos enfoques contrapuestos es que la educación secundaria ha sido el nivel educativo que más reformas ha sufrido en los últimos veinte años. Hasta los años setenta, cuando todavía era frecuente en Europa separar a los alumnos a los diez u once años de edad en dos grupos —los que a la larga podrían acceder a la universidad y los que no— en base a las notas de un examen o reválida, el grupo que ingresaba en la educación secundaria preparatoria era mucho más homogéneo que en la actualidad, por lo menos social, económica y culturalmente. Hoy en día la diversidad es mayor a causa de la democratización y universalización de este nivel experimentada en los países europeos e, incluso antes que en ellos, en Estados Unidos y Japón, motivada, a su vez, por razones políticas y económicas que se concretan en la necesidad de contar con una población mucho más educada.

Hay, pues, una dicotomía entre lo primario, general, universal, básico, obligatorio y gratuito y lo que es particular, específico, optativo y, desde luego, no gratuito generalmente. Para solucionarla se acude con frecuencia a la separación de la educación secundaria en dos ciclos: uno denominado general, inferior o primero, que obedece más a los cánones de la educación primaria y que, con ligeras variaciones, abraza desde los once hasta los catorce años de edad, y otro denominado segundo o superior. El primer ciclo es común a todos los alumnos y obligatorio y gratuito en toda Europa, mientras que el segundo no tiene ya estas características.

En términos generales, los diferentes *curricula* nacionales cuentan con un grupo de asignaturas fundamentales y comunes (lengua propia, una o varias lenguas extranjeras, matemáticas, geografía e historia, ciencias naturales, religión, educación física) que se complementan conforme avanzan los cursos con posibilidades crecientes de elección de otras materias más específicas, según la orientación que adopta el alumno, de acuerdo con sus preferencias y los resultados obtenidos. No es inusual que en el segundo ciclo se produzcan diferenciaciones más globales, que incluso pueden tener denominaciones específicas y cursarse en centros separados. El caso más extremo lo constituye el sistema alemán, que cuenta con cuatro modalidades distintas de escuela secundaria (*Hauptschule*, *Realschule*, *Gymnasium* y *Gesamtschule*) desde el inicio. En cambio, en España la reforma actualmente en curso ha optado por otorgar la misma titulación (*bachiller*) en las cuatro modalidades previstas, que también se cursarán en un único tipo de centros.

La tendencia general apunta a la consolidación del modelo integrado o polivalente (currículo y centro común para todos los alumnos) en el primer ciclo y a la diferenciación en el segundo, solución que algunos teóricos de la pedagogía activa ya habían adelantado a principios de siglo. El español Francisco Giner de los Ríos equiparaba en 1910 estos dos ciclos con dos períodos de la vida humana: "uno general, en el cual el hombre ejercita sus facultades capitales; otro, especial, en el cual, según la tendencia peculiar que en cada individuo predomina, coopera en alguna de las diversas obras que constituyen el sistema de los fines humanos", lo que equivale en la educación secundaria a "un primer

período común, el más largo, para todos los alumnos, y otro segundo período, más corto que el anterior, donde, sin abandonar completamente el resto de asuntos, se inicia un predominio especial de aquellos que libremente el alumno desee cursar en armonía con su interés, vocación y aptitudes".

Esta evolución hacia la generalización de la escuela secundaria integrada o polivalente no está libre de obstáculos. En Francia hubo una clara resistencia al sistema por parte de los profesores, que se pudo superar confiándoles ciertos aspectos del diseño del mismo. En Alemania, las tentativas de implantarlo se efectuaron a escala modesta y a título de ensayo. La idea era evaluar el rendimiento de las escuelas polivalentes experimentales durante un tiempo, compararlo con el del sistema tradicional y, en función del resultado, decidir qué tipo de escuela adoptar en definitiva. Hasta ahora, las tres modalidades de educación secundaria no han sido reemplazadas a gran escala por una *Gesamtschule* polivalente.

La persistencia de las excepciones a la regla general tiene, sin embargo, una explicación. En los países comunitarios más septentrionales, equivalentes al área de influencia germánica y neerlandesa —y más de uno vería en ello las implicaciones de la tradición religiosa protestante—, la escuela secundaria segregada es un hecho difícilmente cuestionable al cual no es ajeno el prestigio incontestable de la formación profesional, en razón de sus particulares vínculos con el mundo del trabajo. El caso más conocido es el alemán, al que deben añadirse los de Luxemburgo, Países Bajos y, hasta cierto punto, Bélgica. En todos estos países, el florecimiento de la industria y de las manufacturas debe mucho a la alta preparación de los obreros cualificados y especialistas, cuya posición social y económica difiere bastante de la de sus colegas de la Europa meridional. Sin embargo, las cautelosas reformas curriculares llevadas a cabo en los últimos años, aun manteniendo diferencias institucionales, han acercado en extremo los contenidos que se imparten a todos los alumnos de educación secundaria, con independencia de cuál sea la denominación del centro donde cursen sus estudios. No hay por qué descartar que el futuro traiga una mayor convergencia curricular y la desaparición de toda segregación de hecho antes de los catorce años de edad. (Francesc Pedró, profesor de educación comparada en la Universidad Nacional de Educación a Distancia.)

Nobel de física 1992

Georges Charpak

En 1947, J. Friedel y G. Charpak compartían pupitre en la Escuela de Minas del 60 del Boulevard Saint-Michel en París. Charpak había pasado por Dachau, allí deportado por su participación en la Resistencia. Pero en aquella promoción de 40 ingenieros nunca se aludió a esa gesta. Las ilusiones estaban dirigidas hacia el futuro. Los jóvenes tenían el sentimiento vivo de que la física francesa padecía un retraso considerable con respecto a otros países. En palabras de Friedel: "Todos queríamos participar en una reconstrucción que nos parecía indispensable. Hay que tener en cuenta que no se impartían enseñanzas de física moderna, estadística o cuántica, en la carrera. Veíamos esta física en los libros extranjeros, e incluso teníamos que ir a buscar nuestros profesores entre la comunidad de químicos, ya que Louis de Broglie había juzgado que la herramienta cuántica podía prestar grandes servicios en química, pero no estaba todavía suficientemente depurada para transmitirla a los físicos."

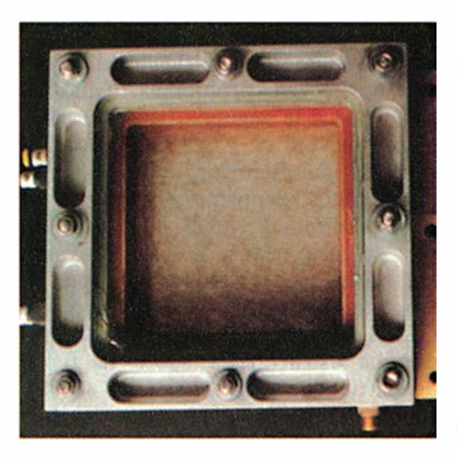
"Hay dos tipos de físicos: los que descubren teorías unificadoras y los que resuelven problemas. Charpak pertenece a la segunda categoría. Inicialmente en el CERN conectó las cámaras de filamento con sistemas electrónicos, e inventó los detectores que valieron el Nobel a muchos de sus colegas; éstos le han apoyado, sin duda, al ser consultados por el Comité Nobel. Sin embargo, el CERN es una organización mastodóntica estructurada sobre la física de partículas. Charpak quería que su sistema se utilizase en otros muchos campos a los que aportó el apoyo de su pasión: detección de rayos X para cristalografía, análisis de biomoléculas y diagnóstico médico. Se confirmaba el espíritu de ingeniero que aún hoy permanece. Trabaja ahora en otras aplicaciones de su invento en un laboratorio de electrónica de la Escuela Superior de Física y Química Industrial (ESPCI)".

Aunque el premio recompensa la puesta a punto de la cámara proporcional de filamentos múltiples realizada por un equipo, se le reconoce a Charpak la paternidad del invento. Se le ocurrió a él analizar los sucesos en tiempo real y filtrar las informaciones en el mismo momento en el que se registraban.

¿Qué piensa Charpak de los comentarios de su antiguo compañero? "¿Yo un ingeniero? No, soy más bien un físico frustrado por culpa de



Georges Charpak durante un curso de geología en el Vercors en 1947.



Cámara multihilo.

las circunstancias. He tardado días en entender los artículos de mis amigos teóricos. Soy demasiado desordenado para ser un buen ingeniero, y no me gustan los grandes equipos. Por el contrario, siempre he trabajado porque tenía el estímulo de un problema. En los años 60 lo que me apasionaba era experimentar: ¿cómo ahorrar el tiempo que se perdía en analizar los millones de fotografías que registran los sucesos de los aceleradores de partículas? Incluso con las cámaras de centelleo desacopladas, cuando ocurrían sucesos interesantes los tiempos de análisis se hacían inaceptables."

En física subatómica, las reacciones provocadas en los aceleradores liberan simultáneamente centenares de partículas de las que sólo algunas representan las señas de identidad de las reacciones buscadas. Antes había grupos nutridos de físicos entregados al análisis de las fotografías de las cámaras de burbujas, donde las partículas dejan el rastro de su paso provocando la condensación de un fluido sobrecalentado. Mas, ¿cómo automatizar este análisis efectuando un primer escrutinio entre las partículas detectadas?

En su cámara proporcional de filamentos múltiples (o multihilo), Charpak supo utilizar la electrónica moderna y percibió la importancia de unir directamente los detectores con los ordenadores, ya que confiar el análisis de las fotografías a los ordenadores habría conservado un paso intermedio que se podía evitar. Adaptó sistemas electrónicos a un dispositivo inventado anteriormente: el contador proporcional, que, como el contador Geiger-Müller, está compuesto de un delgado filamento colocado en el centro de un tubo de un centímetro de diámetro; entre el filamento y la pared del tubo se aplica una tensión eléctrica de unos miles de volts. Una partícula cargada que pase por el gas del tubo lo ioniza de forma que en las proximidades del filamento, donde el campo eléctrico es intenso, los electrones disociados de los átomos se aceleran tanto que provocan la ionización de otros átomos, liberando otros electrones que son igualmente acelerados, y así sucesivamente. La avalancha de electrones e iones positivos que se mueven por el campo eléctrico produce una corriente eléctrica en el filamento.

Ante la dificultad de cubrir amplias superficies con tubos contadores proporcionales clásicos, pensó en multiplicar los filamentos colocándolos paralelamente a un plano emparedado entre dos planos de filamentos catódicos separados un centímetro. Cada filamento funciona como un contador individual proporcional e indica el lugar por donde ha pasado una partícula a una distancia de como mínimo un milímetro. Estos detectores permiten analizar señales de frecuencia que alcanzan varios megahertz. Colocando dos detectores, uno detrás de otro, se puede determinar la dirección en que se emite una partícula: basta correlacionar los sucesos detectados por los dos detectores sucesivos. Este montaje permite aumentar la precisión hasta una décima de milímetro.

Las cámaras, que equipan hoy en día a todos los aceleradores de partículas, se adaptaron a las necesidades de la cristalografía. Cuando se instaló el LURE, acelerador de electrones de Orsay, Charpak participó en la puesta a punto de detectores sensibles a rayos X, que, junto con la gran luminosidad del haz producido por el acelerador, permitieron los primeros análisis de formaciones de biomoléculas. Más recientemente se ha propuesto adaptar su detector a la radiografía médica con la idea de reducir las exposiciones a rayos X indicadas en clínica.

Así llegó hasta el contador proporcional de filamentos múltiples: "Mi tesis había tratado sobre los contadores de gas, y sabía cuán difícil es seleccionar componentes para estos aparatos: si se escoge mal el gas, ¡el amplificador se quema! Para mi último trabajo, basado en la emisión luminosa de las avalanchas, hemos tardado dos años en encontrar una mezcla de cuatro gases de la que apenas estoy satisfecho. Todavía estoy disgustado porque no hay nada más que dos gases verdaderamente operativos: el tetraaminoetileno y la trietilamina, uno de los cuales reacciona con el oxígeno y el otro emite en el ultravioleta, y no en el visible como yo desearía."

"Aunque hayamos resuelto el problema del gas, el paso de un prototipo pequeño a un gran detector ha sido difícil. Gracias a mi experiencia sobre contadores proporcionales tenía la ventaja de haber aprendido que los iones positivos, y no los electrones, son los importantes para la detección de sucesos. No obstante, cuando ha sido preciso pasar a sistemas enormes, me he retirado de puntillas porque no quería trabajar en un equipo gigantesco: me siento con alma de guerrillero y no de general."

"Nuevos problemas me atraen hoy en otras direcciones. Si tuviera más tiempo me ocuparía de la masa oculta del universo. Como el problema es muy difícil, con un pequeño equipo de seis personas busco preferentemente amplificadores de intensidad luminosa que se puedan adaptar a los aparatos de radiografías médicas: si se lograra reducir en un factor de diez o cien las dosis utilizadas de radiación X sería más fácil, por ejemplo, un programa de exploración sistemática del cáncer de mama. Hasta me he entrometido en la fisiología humana, poniendo a punto detectores que captarían las emisiones del tritio utilizado para marcar las moléculas administradas a los pacientes. Así se podría comprender mejor sin riesgo los mecanismos de las enfermedades."

Dinámica desertícola

Competencia en los ecosistemas complejos

A quienquiera que haya observado a pájaros dándose empellones unos a otros en el comedero de un jardín, la idea de que las especies compiten por los recursos le parecerá obvia. Pero, por extraño que resulte, los ecólogos no se han puesto de acuerdo, muchísimas veces, sobre la importancia real de la competencia en los ecosistemas naturales. Algunos afirman que los factores climáticos, piénsese en la temperatura y la pluviosidad, ejercerían un papel más decisivo; los conflictos por el alimento, siguen razonando, sólo entrañarían interés durante las épocas difíciles, cuando escasean los lugares de alimentación alternativos.

Dura tanto el debate sobre la competencia porque, entre otras razones, se han de contar *in situ*, en su hábitat natural, los animales; tarea nada fácil que se agrava por culpa del sistema de becas con que se financian los experimentos de campo: se conceden para un lapso corto, que

impide el seguimiento a largo plazo. De este tenor es el que está realizando James H. Brown, de la Universidad de Nuevo México, quien estudia las interacciones entre roedores, aves y plantas en el desierto de Chihuahua, de Arizona sudoriental. En un informe reciente, Brown llega a la conclusión de que existe una competencia persistente y uniforme entre las especies, a pesar de la importancia de los efectos climáticos sobre el número de individuos.

El grupo de Brown empezó, hace 15 años, vallando 24 parcelas, de 50 metros cuadrados de superficie, de una zona desértica próxima a Portal. Las cercas, de malla de alambre, se elevan 60 centímetros por encima del suelo y se hunden otros 20 por debajo, para que los animales sujetos a estudio (ratas canguro, ratones de patas blancas y otros roedores) no las excavaran. Se dejaron inalteradas algunas parcelas. En varias, se cerró el paso a los roedores mayores con agujeros en las vallas cuyo diámetro estrecho no pudieran atravesar; en otras, eliminaron distintas combinaciones de especies. Se fueron anotando el número de distintas plantas y animales, así como los cambios producidos al correr del tiempo.

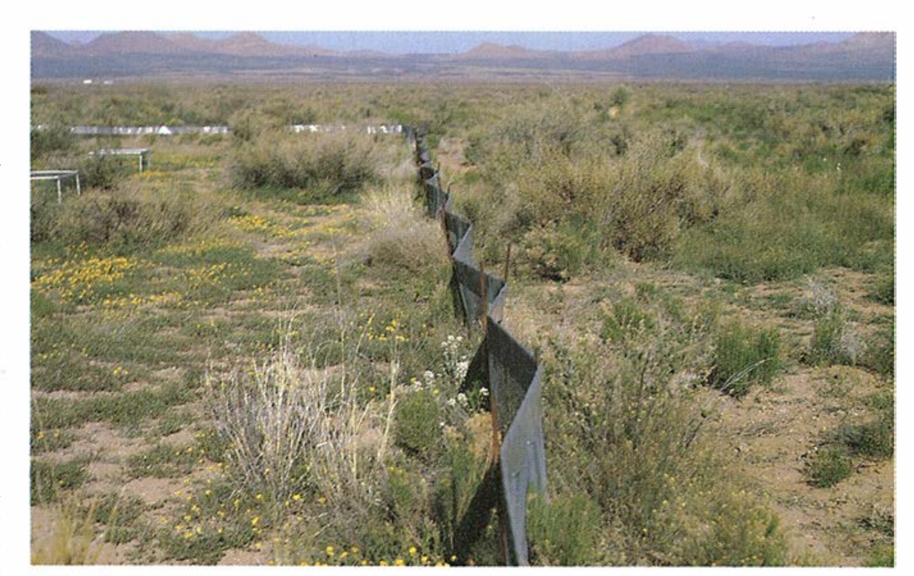
En las parcelas inalteradas, los ocho roedores del desierto que estudiaron variaban de forma sorprendente en su respuesta a las condiciones cambiantes del medio. Algunas especies exhibieron una pauta repetitiva de cinco años de duración, que Brown relaciona con El Niño y la Oscilación del Sur, un ciclo climático que provoca fuertes lluvias invernales en los Estados Unidos sudoccidentales; otras, sin embargo, no se inmutaron, aun cuando todos los roedores se alimentan de semillas, que las plantas producen durante los años húmedos en mayor número que durante los secos.

A tenor de la investigación, resulta imposible predecir cómo iba a responder cada especie. Sus experimentos, resalta Brown, no respaldan la tesis (recogida en los manuales de biología) según la cual las comunidades ecológicas alcanzan los equilibrios adecuados para su región geográfica. La naturaleza no es tan insulsa. En sus parcelas experimentales, equilibrio fue lo único que no hubo. Para ser exactos, "la composición de la comunidad varió continuamente a lo largo del tiempo".

La eliminación con fines experimentales de determinadas especies aportó datos de una dinámica compleja, incluso en un ecosistema bastante elemental. La supresión de una especie, asevera, puede conducir a efectos en cascada que se prolongan años. Así, cuando extrajo las tres especies de ratas canguro de varias parcelas, encontró que el hábitat cambiaba de forma espectacular en el decurso de pocos años. Ciertas especies de hierbas colonizaron los intervalos entre arbustos y se multiplicaron, en tanto que otras hierbas, éstas cortas, comenzaban a escasear.

Lo mismo que los roedores, las aves se alimentan de semillas. No sería extraño, pues, que la eliminación de aquéllos en una parcela tornara a ésta más atractiva para los pájaros. Sucede el fenómeno opuesto: las aves forrajean menos en las parcelas sin roedores. Además, muestran una aversión similar hacia las parcelas de las que se han eliminado todas las hormigas, aunque las hormigas, como las aves y los roedores, se alimentan de semillas. Para el equipo de Brown, los roedores y las hormigas refuerzan el atractivo de las parcelas al establecer pistas y crear áreas de suelo desnudo; los pájaros evitarían las parcelas de vegetación densa porque en ellas tendrían que invertir más esfuerzo para conseguir la misma cantidad de comida.

A pesar de la complejidad, el análisis estadístico demostró que las interacciones competitivas seguían constituyendo una fuerza importante. Cuando Brown, Mark L. Taper y Edward J. Heske examinaron el efecto global ejercido por la rata canguro sobre los demás roedores granívoros en sus parcelas a lo largo de un período prolongado, apareció un dato clarísimo: los roedores chicos prefieren alimentarse allí donde no lo ha-





La vegetación cambia de manera notable cuando se sacan las ratas canguro de una parcela experimental (a la izquierda de la valla). *A los cinco años, la planta anual* Lesquerella gordonii (flores amarillas) *se ha multiplicado* (arriba). *Transcurridos otros ocho años, dominan las hierbas altas perennes y las anuales* (abajo). *Fotos: James H. Brown.*

cen las ratas canguro; fenómeno éste que persistía a lo largo del tiempo.

Brown se muestra cauto a la hora de generalizar a partir de sus resultados. El desierto de Arizona no tendría por qué representar otros ecosistemas. Si bien, añade de inmediato: "nuestro experimento, de duración suficiente para establecer la variación temporal a largo plazo debida a la competencia, es único". Y en un artículo presentado a la revista *Ecology*, titulado "Competencia constante en un ambiente variable", llega a una conclusión que no deja lugar a dudas. "La competencia interespecífica, escribe, desempeña un papel importante y sostenido en la estructura y dinámica de esta comunidad de roedores desertícolas".

¿Un paraíso perdido?

Se extiende la resistencia contra los fármacos

Poco después de que la penicilina alcanzase, allá por los años cuarenta, un uso generalizado empezaron los primeros casos de bacterias resistentes. Con los años, a medida que se desarrollaron antibióticos más potentes (estreptomicina, tetraciclina y cloranfenicol), surgieron también bacterias que hacían frente a la acción del fármaco. Hoy día, bacterias y hongos resistentes ante drogas de eficacia probada en épocas anteriores causan muertes y elevan los costos médicos en todo el mundo.

El problema de la resistencia no preocupó a los médicos, convencidos de disponer de cualquier antibiótico que necesitaran. Pero andaban equivocados. La resistencia se observa en la inmensa mayoría de microbios que hayan sido objeto de antibióticos, sin excluir de ahí los microorganismos patógenos cuyo vehículo son los alimentos, como es el caso de la *Salmonella*, ni los que se transmiten por contagio sexual, como la *Neisseria gonorrhoeae*. Muchos pacientes mueren en el postoperatorio debido a las heridas infectadas por bacterias enterocócicas resistentes a distintos fármacos.

Aunque una infección resistente a un fármaco puede quizá curarse sustituyéndolo por otro, el número de agentes patógenos resistentes a varias drogas sigue creciendo. Durante los años ochenta, se han multiplicado por doquier los brotes de disentería, cólera y neumonía, por citar sólo unos ejemplos, resistentes simultáneamente a varios fármacos. Y en los dos últimos años ha saltado la voz de alarma ante la presencia de *Mycobacterium tuberculosis* con este tipo de resistencia múltiple. Se daba por supuesto que el azote que un día representó la tuberculosis había quedado eliminado en los países desarrollados.

La resistencia de la tuberculosis (TB) a fármacos representa una amenaza muy preocupante porque, a diferencia de otras infecciones graves, "el comportamiento que lleva consigo el riesgo principal de contraer la enfermedad está vinculado a la respiración", en palabras de Barry R. Bloom y de Christopher J. L. Murray aparecidas en un número reciente de *Science*. Bloom y Murray señalan que la TB es la causa más frecuente de muerte por infecciones en todo el mundo, con ocho millones de casos nuevos y 2,9 millones de muertes cada año.

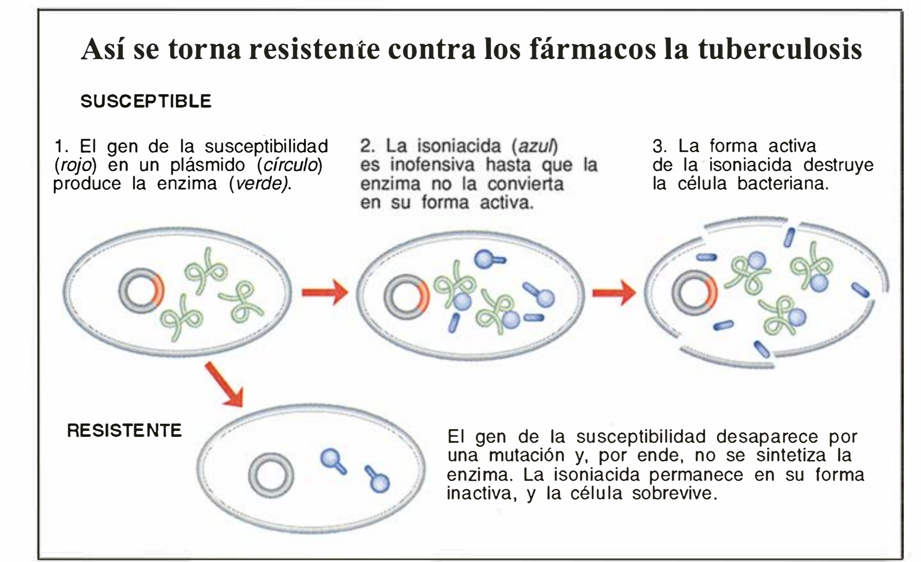
La TB no complicada puede curarse con un ciclo de antibióticos administrado durante seis meses, pero las perspectivas para los casos de resistencia múltiple a los fármacos es sombría. Los casos resistentes a dos o más de los antibióticos principales presentan una mortalidad de un 50 %; los pacientes infectados por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), el agente causante del SIDA, sucumben en unas pocas semanas. Según Bloom y Murray, los intentos de tratar a los pacientes VIH positivos pueden haber dado lugar a la aparición de la resistencia de *M. tuberculosis* a casi todos los fármacos contra la TB. La enfermedad se está extendiendo también con rapidez entre personas no infectadas por el VIH.

Muchas bacterias resistentes a los fármacos poseen genes que les capacitan para producir enzimas que destruyen los antibióticos o provocan su expulsión del interior de la célula bacteriana. Y como las bacterias pasan sus genes no sólo a otros miembros dentro de una misma especie, sino también a los de otras especies, los genes que confieren resistencia a los fármacos habituales se están propagando vertiginosamente.

El grupo de Ying Zhang, del Hospital Hammersmith de Londres, descubrió el verano del año pasado las bases de la resistencia a la isoniacida, uno de los fármacos que se emplean frecuentemente en el tratamiento de la TB. Por sorprendente que resulte, la resistencia obedece aquí a la pérdida de un gen dentro de un plásmido o lazo de ADN. Ese gen capacita al microbio de la TB para transformar la isoniacida en una forma activa.

Ocurre, sin embargo, que los laboratorios farmacéuticos han ido apartándose de la investigación sobre antibióticos y agentes microbianos, para centrarse en el desarrollo de agentes anticancerosos y antivíricos, dándose el caso de que cuando, en 1991, renació la atención hacia la TB resistente, no se disponía ni de estreptomicina ni de para-aminosalicílicom, los fármacos antaño empleados para tratar la enfermedad.

La OMS presta ayuda a varios países para el desarrollo de programas encaminados al control de la TB. En los Estados Unidos, el CDC comienza a realizar el seguimiento de la resistencia a fármacos en distintos organismos, incluido el *M. tuberculosis*. Mientras tanto, los médicos podrían frenar la difusión de la resistencia absteniéndose de usar antibióticos de potencia exagerada. Alrededor de la mitad de los antibióticos que se usan son inadecuados, subraya Calvin M. Kunin, que preside una comisión sobre antibióticos dependiente de la Sociedad Americana de Enfermedades Infecciosas.



Agujeros negros

En los últimos diez años se ha producido un gran avance en la búsqueda observacional de agujeros negros gracias a la aplicación de técnicas espectroscópicas que permiten determinar curvas de velocidad radial de estrellas sin degenerar que orbitan en torno a objetos colapsados. La masa del objeto obscuro se revela así a través de su influencia gravitatoria sobre una estrella próxima.

En su investigación se dan los pasos siguientes. Se empieza por identificar un candidato a agujero negro, esto es, un objeto muy compacto cuya masa triplica, de lejos, la solar; en el caso de cuerpos dotados de masa menor hablamos de estrellas de neutrones o enanas blancas. La identificación suele hacerse mediante la detección de la emisión en altas energías, por satélites o sondas estratosféricas que trabajan en rayos X, y más recientemente en rayos γ. Los rayos X y γ procedentes de candidatos a agujeros negros presentan características diferentes de esa misma radiación emitida por estrellas de neutrones.

Tras esa primera etapa, se busca luego si el posible agujero negro tiene una contrapartida óptica. Si la posee, se estudian sus propiedades mediante observaciones fotométricas y espectroscopía de baja resolución. En el caso de que el candidato a agujero negro tenga una estrella asociada, se recurre a la espectroscopía de resolución intermedia para descubrir los rasgos propios de la fotosfera de la compañera y analizar los desplazamientos espectrales provocados por el efecto Doppler. La periodicidad de estos desplazamientos de líneas constituye una medida directa del período orbital de la estrella en torno al objeto compacto. Mediante consideraciones dinámicas sencillas (no relativistas) se puede inferir la función de masas del sistema binario y, en consecuencia, establecer un límite inferior a la masa de la primaria.

Se conocen cuatro sistemas binarios de este tipo, llamados binarias de rayos X, cuyas primarias tienen masas mayores que tres veces la solar, por lo que respaldan la hipótesis de que nos hallamos ante auténticos agujeros negros. En el último descubierto, V404 Cisne, la estrella secundaria se mueve con una amplitud de más de 400 kilómetros por segundo y un período de 6,47 días; la masa de la primaria invisible sextuplica la masa solar.

El espectro de la estrella que gira en torno al probable agujero negro V404 Cisne presenta, además, un rasgo espectral cuya fuerte intensidad era totalmente inesperada: el doblete de resonancia del litio neutro, gracias a lo cual se puede analizar la concentración de litio en la superficie estelar.

La línea de LiI suele ser muy débil en los espectros estelares normales, porque se trata de un elemento que se destruye con facilidad en el interior de las estrellas y el material sin litio es transportado rápidamente hasta la superficie estelar por convección. La abundancia de litio en la secundaria de V404 Cisne, que supera en más de un orden de magnitud la concentración solar del mismo, se asemeja a la reconocida en las estrellas más jóvenes de nuestra galaxia.

Desde un primer momento se formaron dos hipótesis para dar cuenta de tamaña concentración de litio. Por un lado, la juventud del sistema binario, en razón de la cual la secundaria no habría tenido tiempo suficiente para destruir el litio; por otro, la creación del litio como resultado de reacciones muy energéticas en el entorno del agujero negro. Aunque todavía no se haya podido comprobar o rechazar definitivamente ninguna de las dos, la hipótesis de la generación de litio reviste mayor atractivo, al tiempo que se confirma con los nuevos datos que van apareciendo.

¿Cuál es la relación entre producción de litio y agujeros negros? No abunda ese elemento en el sistema solar, concentración que resulta todavía más pobre en el Sol y la mayoría de las estrellas. La medida de su abundancia en diferentes contextos astrofísicos es, sin embargo, del máximo interés para cuestiones muy dispares, desde la nucleosíntesis primordial (en la gran explosión u otros modelos del origen del universo) hasta la evolución estelar (mecanismos de transporte, estratificación de temperaturas, etcétera), pasando por las enanas marrones (detección de objetos con masa inferior a la masa límite de quema del hidrógeno).

El origen y evolución hasta nuestros días del litio en la galaxia plantea muchas incógnitas. Se sabe que su concentración en las estrellas más viejas es bastante uniforme, lo que constituye, a su vez, un punto de apoyo observacional para la teoría de la gran explosión. Esa concentración se decuplica en el medio interestelar y en las estrellas muy jóvenes. Para justificar esa diferencia es necesario encontrar mecanismos que puedan enriquecer en litio el gas ambiente de la galaxia, haciendo que las sucesivas generaciones de estrellas se formen con una abundancia de litio cada vez más elevada. Ello motiva la búsqueda de fuentes galácticas de litio.

Jin postuló en 1990 que, en las inmediaciones de agujeros negros, podrían producirse chorros de núcleos de helio dotados de muy alta energía y capaces de astillar átomos de helio, carbono y oxígeno en el disco de acreción en torno al objeto compacto. Tales reacciones de astillado formarían principalmente litio, y en menor proporción otros elementos ligeros, como el boro y el berilio. La observación del litio en V404 Cisne y en otras compañeras de agujeros negros (todavía sin publicar) puede ser una confirmación observacional del mecanismo de Jin. La aportación continua de materia de la secundaria al disco de acreción en torno al agujero negro hace este proceso más eficiente de lo que Jin había supuesto. Las observaciones permitirán, quizá muy pronto, conocer el papel desempeñado por los agujeros negros en el origen y evolución del litio y otros elementos ligeros de nuestra galaxia. (Eduardo Lorenzo Martín Guerrero de Escalante, del Instituto de Astrofísica de Canarias.)

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi



Agua de bambú

En la historia de la evolución, hay un hito señalado: la aparición de las plantas terrestres. Proceden, se supone, de algas verdes primitivas. En ese tránsito de la vida en el agua a las duras condiciones de tierra firme hubieron de adquirir, entre otros pertrechos, una cutícula cerosa, un tejido conductor y poros o estomas.

Pero las plantas siguen manteniendo una relación de dependencia con el agua. Una disciplina reciente, la biomecánica vegetal, funda buena parte de su núcleo doctrinal en el estudio del transporte hídrico a través de las células, tejidos, órganos y cuerpo de la planta. Y hoy, uno de los capítulos de más activa investigación es el de cómo ampliar el conocimiento del flujo y otras características hidráulicas en conductos y poros no circulares a las aberturas excéntricas y conductos cuyas bocas forman polígonos irregulares.

Andaba dándole vueltas a las nuevas conjeturas, cuando cierta mañana de la estación lluviosa me quedé sorprendido por la belleza de la exudación acuosa de una planta de bambú que manaba por la misma punta de la hoja. Era como una pausada contribución al ciclo del agua que mueve al mundo orgánico. De los estomas salían perlas finísimas que se fundían en la caída libre. Y pensé si no se trataba de una respuesta herida al cinismo de Christopher Lloyd, hábil teórico y experto jardinero: "lo más bonito de las plantas acuáticas es que no hay que regarlas".









Lámina de la derecha
distancia focal: 80 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/6000 de segundo
película: ISO = 50



Representación visual de biomoléculas

La generación de imágenes por ordenador agiliza la investigación de la estructura molecular y contribuye a elucidar la química de la vida

Arthur J. Olson y David S. Goodsell

"El ojo, al que se llama ventana del alma, constituye el medio principal por cuya virtud el entendimiento logra apreciar más plena y abundantemente las obras infinitas de la naturaleza." Las palabras de Leonardo da Vinci expresan con elocuencia la íntima relación entre visión y comprensión. A pesar de lo cual, la ciencia moderna se enfrenta no pocas veces a objetos invisibles por el ojo humano. Químicos y bioquímicos hallan entorpecida su tarea por la imposibilidad de observar las moléculas que estudian. Los componentes atómicos de las moléculas no son discernibles ni siquiera a través del microscopio electrónico.

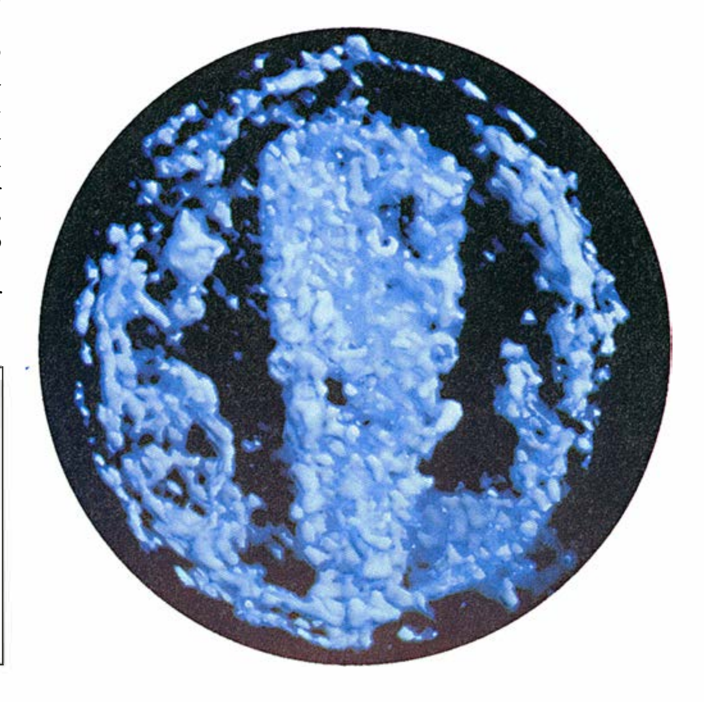
Pero la tecnología informática permite elaborar imágenes convincentes y científicamente exactas de las moléculas construidas por las células. El grafismo por ordenador contribuye a desvelar, por ejemplo, la forma en que los anticuerpos buscan moléculas extrañas, la manera en que las enzimas proporcionan el ambiente exacto y adecuado para iniciar una reacción química. A veces las imágenes cobran gran peso conceptual; piénsese en el diagrama de la estructura en doble hélice del ADN, publicada por James Watson y Francis Crick, que revolucionó nuestra comprensión de la herencia humana y de las enfermedades genéticas.

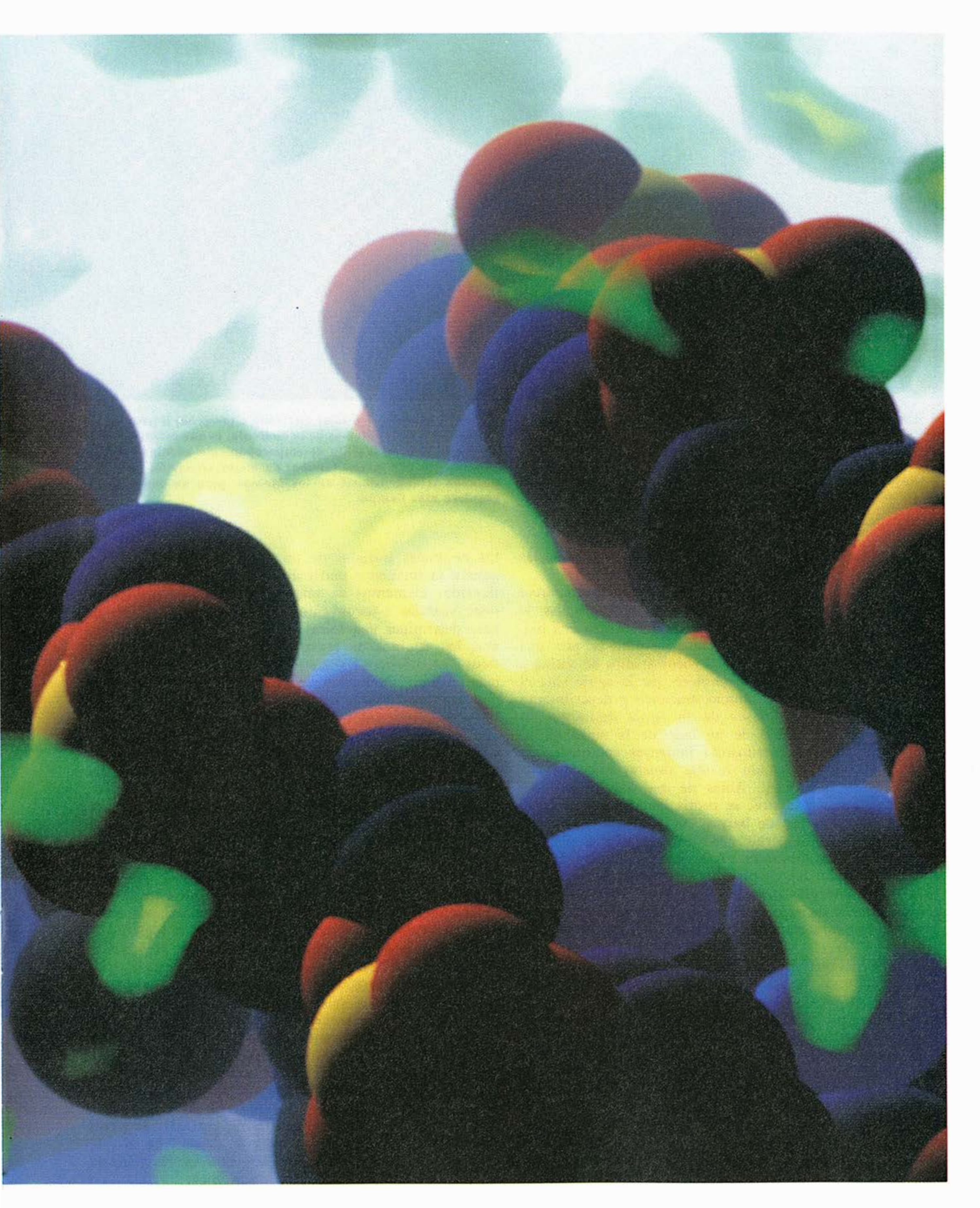
Varias son las formas de recoger los datos en bruto para la confección de imágenes. Por su éxito, destaca la cristalografía de rayos X. En esta técnica se irradia con un haz intenso de rayos X un cristal compuesto por una molécula determinada; los rayos X se dispersan según pautas características, pautas que se analizan matemáticamente para descubrir la distribución espacial de los electrones y, por extensión, la ubicación de cada átomo de la molécula.

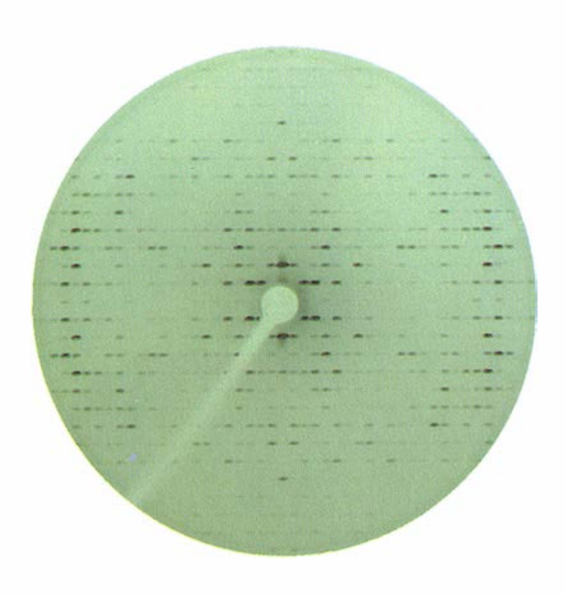
La espectroscopía por resonancia magnética nuclear (RMN) ofrece otra vía para la determinación de la estructura de una molécula. En un campo magnético intenso se sitúa una disolución que contenga la molécula de interés. A continuación, sometemos la muestra a impulsos de ondas de radio; los núcleos de ciertos átomos de la molécula responden emitiendo ondas de radio propias, cuyas frecuencias dependen de los ambientes químicos locales. La interpretación de estas frecuencias revela las distancias aproximadas entre los átomos de las moléculas. Al combinar estas restricciones con propieda-

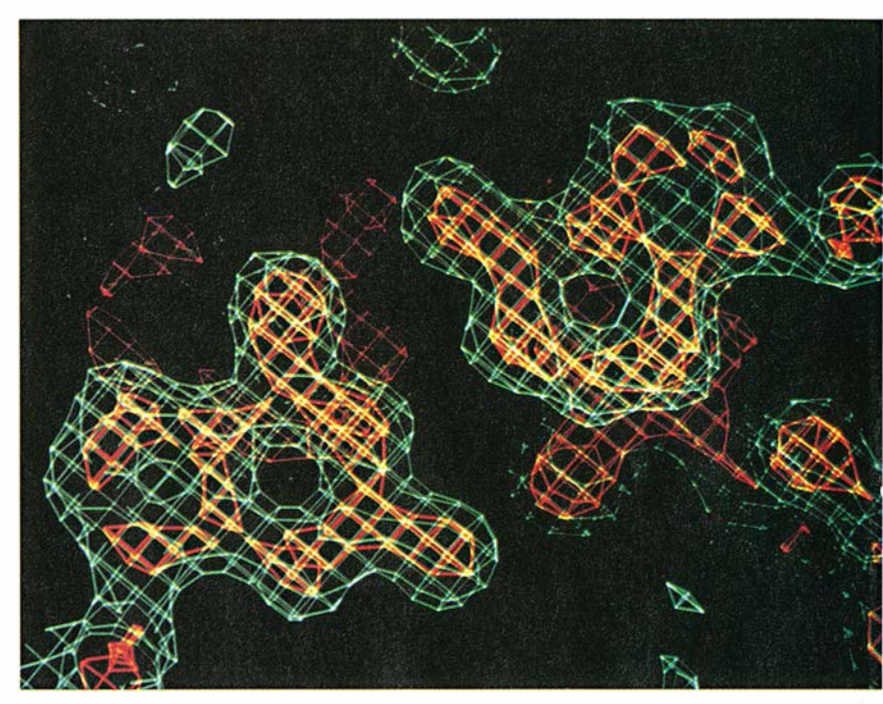
ARTHUR J. OLSON y DAVID S. GOODSELL trabajan para ampliar el papel del grafismo informático en el estudio de la función y la estructura de macromoléculas biológicas. Olson, que se doctoró en la Universidad de California en Berkeley, fundó en 1981 el laboratorio de grafismo molecular en el Instituto de Investigación de la Clínica Scripps. Goodsell se doctoró en 1987 por la Universidad de California en Los Angeles, donde también estudió cristalografía por rayos X. Ingresó seguidamente en el laboratorio de Olson, donde desarrolla técnicas de presentación de imágenes moleculares y métodos computacionales para el diseño de medicamentos.

1. IMAGENES SIMULADAS del mundo molecular, creadas mediante grafismo informático. Una imagen del virus de inmunodeficiencia humana (*abajo*), basada en datos obtenidos mediante microscopía electrónica por U. Skoglund y por S. Höglund, muestra un núcleo de forma cónica que contiene material genético, rodeado por una envoltura esférica. A la derecha tenemos una vista de una droga ligándose al ADN, trazada a partir de datos de cristalografía de rayos X recopilados por R. E. Dickerson. La droga es la región de elevada densidad electrónica (*verde y amarillo*) que rellena el estrecho surco del ADN (*esferas oscuras*).









2. LA CRISTALOGRAFIA por dispersión de rayos X proporciona la información necesaria para simular la imagen de una molécula. Un cristal de ADN dispersa los rayos X según pautas características (*izquierda*). El análisis computarizado de la pauta de dispersión puede revelar la distribución de electrones en cada molécula de ADN. Una red de líneas trazada en torno a las regiones de elevada densidad electrónica (*derecha*) ilustra las demarcaciones de los átomos de la molécula; lo que estamos viendo corresponde a un insólito desemparejamiento adenina-guanina. Una imagen por píxeles (*arriba*) da mejor sensación de la disposición tridimensional de los átomos, pero su computación requiere más tiempo.

des químicas conocidas de la molécula, inferimos las posiciones de los átomos constituyentes.

La ciencia de los materiales ha desarrollado un tercer método de observación de los átomos en las moléculas: la microscopía por sonda exploradora. Se inmoviliza una molécula sobre una superficie plana, explorada por una aguja cuya punta tiene sólo unos pocos átomos de anchura. Un bucle de realimentación permite que la aguja siga el contorno exacto de cada átomo, trazando y describiendo su forma. Repetidos pases de la aguja delimitan un contorno tridimensional de un lado de la molécula.

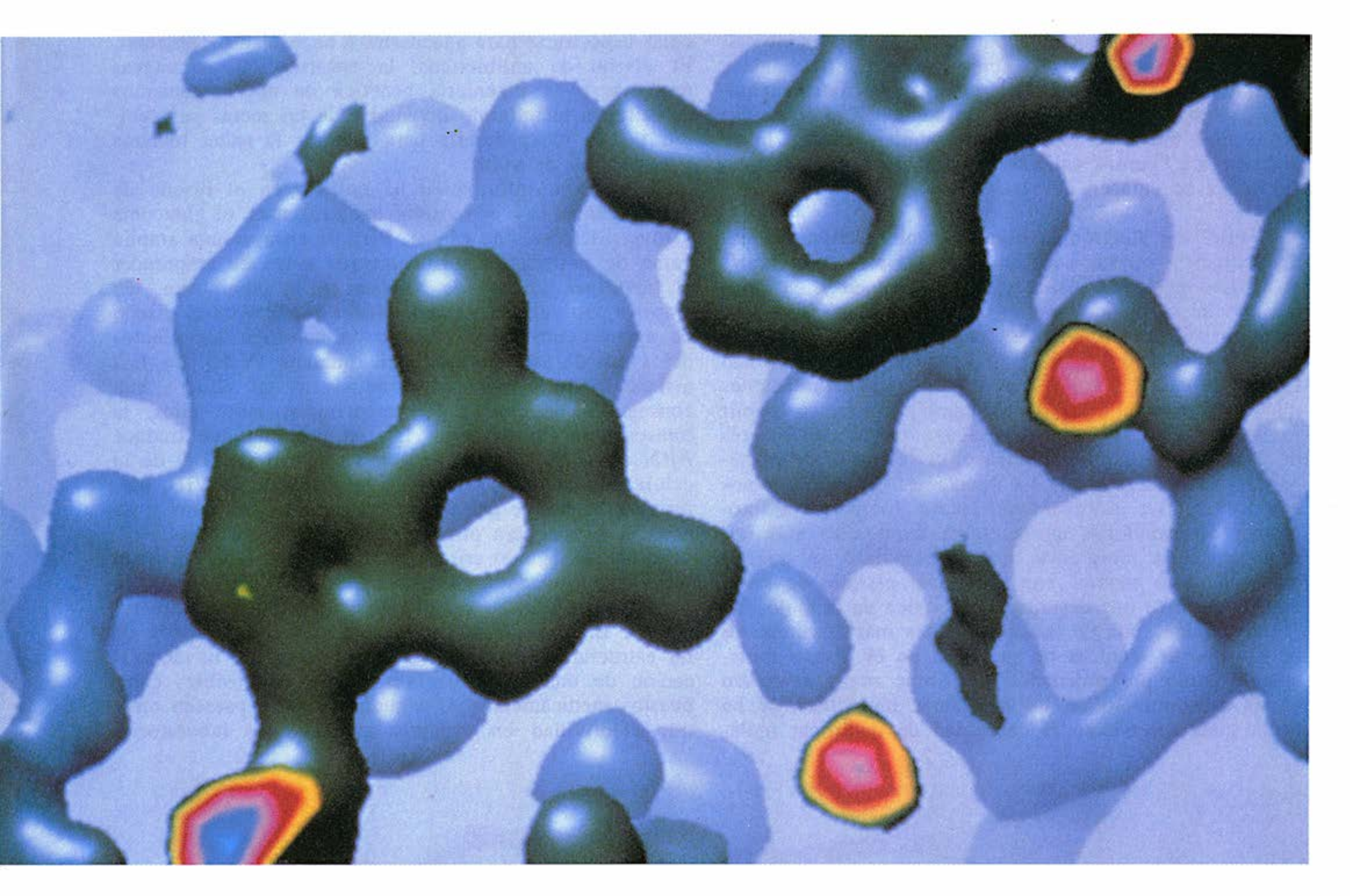
Las tres técnicas suministran inmensas cantidades de datos, cuya interpretación resulta mucho más sencilla vertidos a forma visual. Antes de que los ordenadores llegaran a los laboratorios, se cernía laboriosamente información en diagramas de barras, oscilogramas y fotografías, para luego construir modelos de latón o plástico basados en tales resultados. Ante la enorme cantidad de trabajo requerido, los científicos se veían limitados a estudiar micromoléculas que no contuvieran arriba de unas pocas docenas de átomos. Pero las moléculas biológicas constan de centenares a cientos de miles de átomos.

En 1947, Raymond Pipinsky, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ideó y puso a punto una máquina analógica, la XRAC, para transformar los datos cristalográficos que obtenía por dispersión de rayos X en una imagen molecular inteligible. A la par de los avances en informática ha crecido también la magnitud de los problemas a que es aplicada. Los ordenadores digitales, utilizados en conjunción con sistemas de representación gráfica computarizada, permiten crear imágenes detalladas de macromoléculas: enzimas, anticuerpos e incluso virus completos.

Dos métodos, conceptualmente distintos, son los predominantes en la creación de imágenes de moléculas. En uno de ellos, la imagen se construye a partir de conjuntos de líneas trazadas de un punto a otro. El segundo genera la imagen a partir de un mapa denso de puntos, llamados elementos de imagen, o píxeles. Cada técnica tiene ventajas e inconvenientes característicos. Dado que para determinar una recta basta especificar dos posiciones, los equipos de representación diseñados para gráficos "esqueléticos" ("gráficos vectoriales") permiten la manipulación interactiva de la imagen. La generación de imágenes en equipos pensados para el trazado de puntos (el monitor en color) requiere mucho más tiempo, porque a cada elemento de imagen hay que asignarle un valor de color; un monitor típico contiene más de un millón de puntos. Pero las pantallas de trazado por puntos admiten la simulación de efectos de gradación y sombra, que dan mayor realismo a las imágenes.

Para construir una imagen molecular, se empieza por recopilar información sobre la estructura de la molécula; casi siempre, por medios roentgenocristalográficos. Los rayos X sufren máxima dispersión allí donde mayor es la densidad electrónica, vale decir, en torno a los átomos de la molécula. Por tanto, las regiones que exhiben elevadas densidades electrónicas son átomos; las regiones de baja densidad corresponden a espacio vacío. (También la microscopía electrónica puede proporcionar mapas tridimensionales de densidad electrónica; aunque son parecidos, no alcanzan a resolver átomos individuales.)

De igual manera que los cartógrafos se valen de líneas de nivel para separar valles de montes, los cristalógrafos se valen del grafismo informático para trazar una superficie límite en los datos que separe del espacio vacío los átomos. La superficie puede representarse mediante una espesa malla de líneas que recuerdan la jaula de un canario. Armado de un programa de gráficos, el científico sitúa y acomoda una cadena de átomos en el interior de la superficie siguiendo las convoluciones indicadas por los datos de densidad electrónica.



Las imágenes basadas en píxeles proporcionan una visión más clara de los resultados cristalográficos. Podemos, por ejemplo, asignar colores y propiedades ópticas específicas a diversos valores de los datos. En el mapa de densidades electrónicas del ADN, las regiones de la molécula que poseen valores elevados de densidad aparecen opacos y en color, mientras que las regiones de baja densidad se muestran transparentes. Merced a un proceso denominado "rendición volumétrica", los programas de graficación construyen imágenes que remedan la forma en que viajaría la luz a través de objetos que poseyeran tales propiedades ópticas. Desdichadamente, la presentación de objetos tridimensionales exige tiempos de cómputo mucho mayores que los necesarios para la presentación de imágenes esqueléticas. La ganancia en claridad se logra a costa de menor velocidad de manipulación de la vista de la molécula.

Una vez conocidas las coordenadas de los átomos constituyentes, la computadora ofrece una pléyade de técnicas para el análisis de la molécula. El infografismo molecular puede centrarse en la preparación y simplificación de la imagen de la molécula al tiempo que salvaguarda toda la información pertinente. Aclara muchas cosas la forma en que se pliega una cadena proteínica. Jane S. Richardson, de la Universidad de Duke, ha popularizado una representación gráfica sencilla y efectiva, que sigue el plegamiento general de la proteína pero elimina el confuso revoltillo de los átomos individuales El diagrama resultante, similar a una cinta, facilita la clasificación de muchos y diversos tipos de estructuras proteínicas, reduciéndolos a un número limitado de distintos motivos de replegado.

Los ordenadores facilitan también el estudio de la forma de una molécula biológica, la cual, a su vez, determina la manera en que interactúa con otras. El modo más sencillo de mostrar la topografía exterior de una molécula consiste en crear un diagrama de ocupación del espacio. En este procedimiento, el ordenador dibuja los átomos de las moléculas dándoles forma esférica, cuyos radios reflejan en qué medida pueden aproximarse unos a otros. Al colocar todas las esferas en sus posiciones correctas se logra una imagen lúcida de la molécula entera. Y al colorear cada átomo de acuerdo con su naturaleza química se aporta más información.

Las imágenes producidas por rellenado del espacio nos muestran la molécula cual se nos ofrecería si se ampliara hasta tamaño visible. B. K. Lee y Frederic M. Richards adoptaron un método diferente y calcularon qué aspecto le ofrecería una molécula a una molécula de agua. Se valieron de un programa de ordenador para hacer rodar una molécula de agua en torno a todas las caras y recovecos de cierta molécula, señalando aquellos lugares donde el agua establecía contacto. Dedujeron así una imagen que muestra la superficie de la molécula, pero omite las regiones inaccesibles a las moléculas de agua circundantes. Tal imagen contribuye a elucidar, por ejemplo, de qué forma interaccionan las proteínas con el agua que se halla siempre presente en los sistemas biológicos.

La disposición geométrica de los átomos constituye un aspecto de la naturaleza de una molécula; también son importantes las propiedades físicas y químicas de cada átomo, como su carga, tamaño e interacciones con otros átomos. Peter J. Goodford ha desarrollado un procedimiento para determinar de qué forma interactúa químicamente una molécula con los átomos de otras moléculas. Goodford va colocando sucesivamente un átomo de prueba simulado por ordenador en diversas demarcacio-

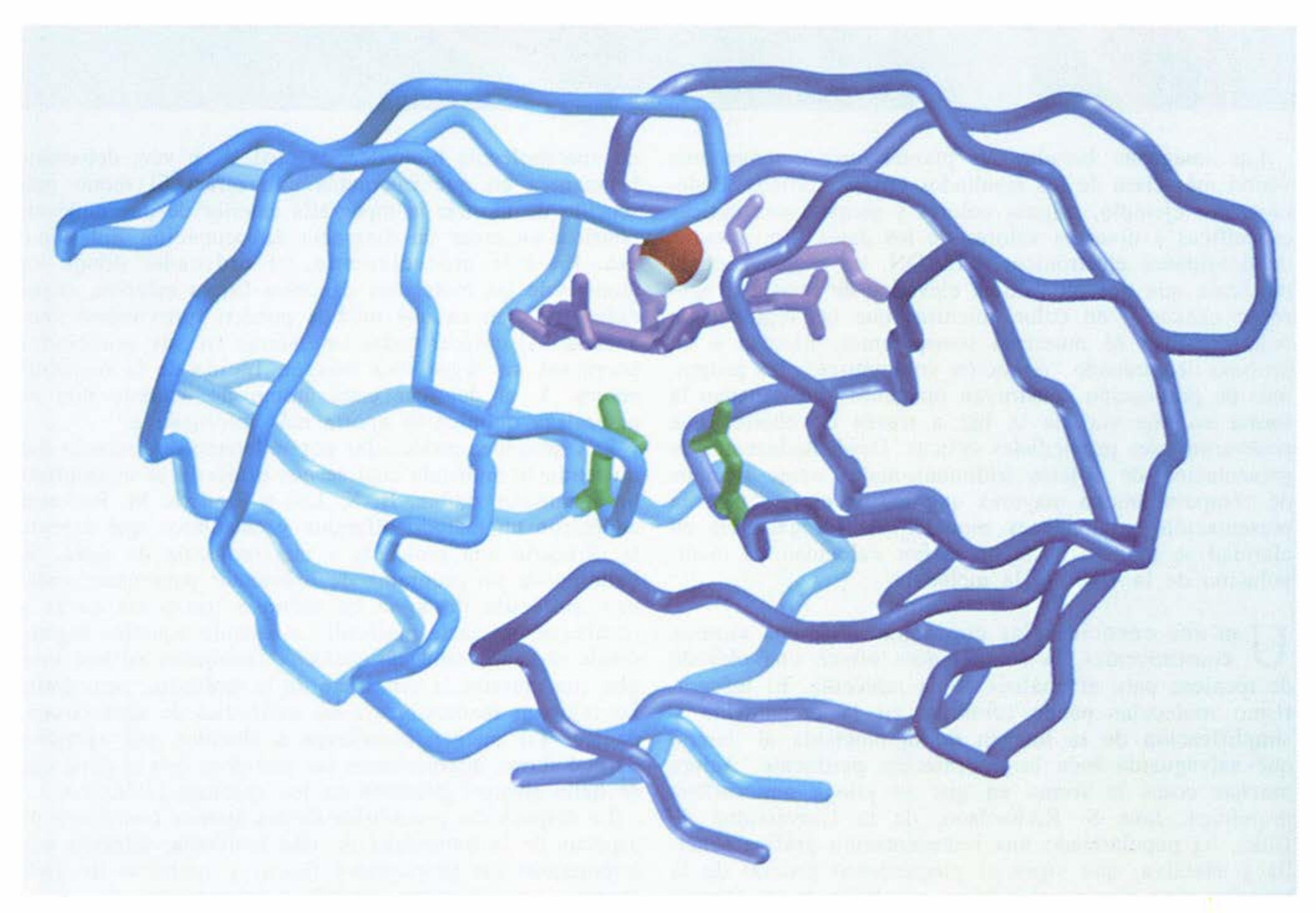
nes de la inmediatez de la molécula. El ordenador calcula en cada punto la interacción química entre sonda y molécula, generando un catálogo de ubicaciones favorables y desfavorables al átomo de sondeo. Las imágenes producidas mediante este tipo de análisis pueden hacer destacar los "puntos calientes" químicos donde es verosímil que se enlacen nuevos átomos.

El grafismo electrónico permite también captar la escurridiza conducta dinámica de las moléculas biológicas. Las moléculas vibran, giran y se retuercen en billonésimas de segundo. Sus movimientos resultan invisibles en el análisis por dispersión de rayos X o en la resonancia magnética nuclear, porque la ejecución de tales experimentos puede exigir horas e incluso días. Las simulaciones dinámicas computarizadas, en cambio, permiten seguir los movimientos de una molécula a través de millares de pasos temporales, generando el correspondiente número de instantáneas de la cambiante estructura. Podemos entonces revisar la simulación entera, fotograma a fotograma, deteniéndonos en las fases temporales más importantes. Los fotogramas más conseguidos se pueden combinar para montar con ellos una especie de corto cinematográfico que describe la dinámica de la molécula.

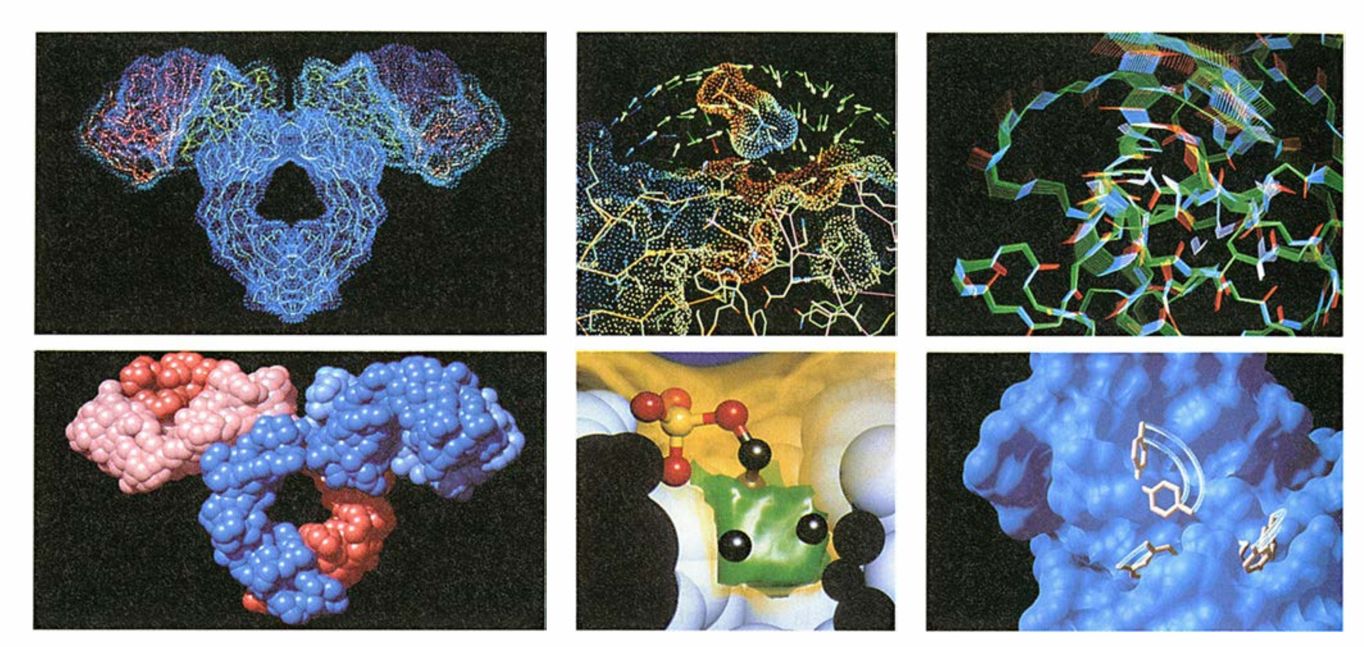
Encontramos una de las aplicaciones más apasionantes de las nuevas técnicas de grafismo en el diseño molecular asistido por ordenador. Conforme se ha avanzado en el conocimiento de las moléculas biológicas, se ha hecho más apremiante la capacidad de modificar moléculas específicas para adecuarlas a necesidades concretas. El diseño de antibióticos, la construcción de nuevas proteínas y la ingeniería genética de microorganismos constituyen un mínimo inventario de las metas perseguidas por la bioengeniería para mejorar la salud humana y la calidad de vida.

El grafismo informático ha entrado en el diseño de drogas contra la hipertensión, los enfisemas, el glaucoma y diversas formas de cáncer. Permite ensayar una amplia gama de potenciales medicamentos antes de emprender el laborioso proceso de síntesis en el laboratorio. Un empeño particularmente prometedor consiste en el diseño de agentes antivíricos capaces de controlar los efectos del virus de inmunodeficiencia humana (VIH). Se han aislado cierto número de proteínas de tal virus y han conseguido determinar sus estructuras; entre ellas, la transcriptasa inversa del VIH, la molécula que traduce ARN en ADN con el fin de incorporarlo al ADN de la célula hospedadora, y también la proteasa del VIH, molécula crucial que permite la maduración del virus y da ocasión a éste para provocar ulteriores infecciones.

Se ha conseguido cristalizar la proteasa del VIH, tanto libre como ligada a diversas moléculas inhibidoras, lo que ha permitido su estudio cristalográfico mediante rayos X. El ulterior análisis por medios informáticos de las estructuras de las moléculas ha facilitado la identificación de una lista cada vez mayor de posibles compuestos medicamentosos. Algunos de ellos parecen mostrar efectividad en ensayos químicos de laboratorio,



3. EL DISEÑO MOLECULAR es una de las aplicaciones de los gráficos moleculares computerizados en más veloz crecimiento. La proteasa del VIH (*arriba*), una molécula crucial para la maduración del virus, constituye una atractiva diana en el diseño de medicamentos. Se muestra en azul el espinazo de la proteína; el sitio de actividad catalítica aparece en verde. Una droga inhibidora (*violeta*) se engarza en el sitio activo de la proteasa, impidiendo la función vírica normal. Los datos de este modelo han sido tomados de A. Wlodawer, adscrito al norteamericano Instituto Nacional del Cáncer.



4. LA ESTRUCTURA Y FUNCION molecular pueden ser estudiadas con facilidad, claridad y precisión merced a los gráficos informáticos. Las imágenes de la hilera superior fueron trazadas con equipos de gráficos vectoriales, mientras las de la inferior corresponden a imágenes por píxeles. Los investigadores pueden examinar la forma de un anticuerpo valiéndose de una superficie puntilleada (*arriba, izquierda*) o de una serie de esferas sombreadas para hacerlas parecer macizas (*abajo, izquierda*). Los ordenadores permiten representar la ligadura de un antígeno mostrando flechas indicadoras de la dirección del campo electrostático de la molécula (*arriba, centro*) o valiéndose de técnicas de rendición volumétrica para mostrar la intensidad de las interacciones entre carbonos; el verde indica regiones favorables al carbono (*abajo, centro*). Los movimientos internos, extremadamente rápidos, de un anticuerpo pueden representarse a través de una imagen múltiple (*derecha, arriba*) o mediante una serie de instantáneas de momentos físicamente interesantes (*abajo, derecha*).

siendo capaces de detener el crecimiento del VIH en un cultivo celular. Aunque están pendientes de solución los problemas de toxicidad y eficacia en pacientes humanos, al menos uno de los inhibidores de la proteasa del VIH, el Ro31-8959, se ha mostrado bastante prometedor y está siendo objeto de evaluación clínica.

Animados por lo mucho que se ha progresado en la comprensión de la estructura y función proteica, Richard A. Lerner y sus colegas de la Clínica Scripps se han embarcado en un proyecto especialmente ambicioso: el diseño de enzimas "a la medida" para catalizar (vale decir, facilitar) ciertas reacciones químicas. Modifican anticuerpos para que actúen de catalizadores. Los anticuerpos poseen una notable capacidad para reconocer y distinguir diversas moléculas, por lo que podría ser construido un anticuerpo catalítico al objeto de facilitar una reacción cuidadosamente seleccionada. Quizá llegue el día en que anticuerpos catalíticos diseñados específicamente logren atacar un virus o fragmentar un coágulo sanguíneo sin causar daño a las células sanas del paciente.

En colaboración con Victoria A. Roberts, John A. Tainer y Elizabeth D. Getzoff, también de Scripps, Lerner ha modificado un anticuerpo para crear un sitio químico susceptible de enlazar átomos metálicos. Se han apoyado em el grafismo informático. La posibilidad de añadir metales a los anticuerpos constituye un paso importante hacia la síntesis de catalizadores "a la carta", pues son muchas las reacciones que son catalizadas por mediación de átomos metálicos.

Apenas si adivinamos el futuro que el grafismo molecular informatizado nos ofrece. La velocidad y la capacidad de almacenamiento de la maquinaria informática se están duplicando cada 18 meses, lo que da pie a mejoras proporcionales en la versatilidad de los programas. Los equipos de simulación de la realidad —la llamada "realidad virtual"— capaces de sumergir al investigador en un mundo molecular tangible se están haciendo realidad. Existen ya cascos dotados de pantallas de vídeo que mueven la imagen obedeciendo a los movimientos de la cabeza; dispositivos de realimentación de fuerzas permiten al sujeto "percibir" de forma táctil las fuerzas que actúan sobre la molécula que están examinando.

En un prototipo que se está desarrollando en la Universidad de Carolina del Norte bajo la dirección de Frederick P. Brooks Jr., se recurre a un simulador computarizado para ensayar posibles drogas "palpando" cómo encajan en una molécula diana. Un proyecto muy novedoso desarrollado en esas mismas instalaciones ha conectado un microscopio de barrido por efecto túnel con un sistema de realidad virtual. Tal sistema se propone capacitar al experto para ver y sentir los detalles atómicos de una molécula examinada bajo el microscopio. Tales sistemas podrán facultarnos para interactuar con el mundo submicroscópico, como si se tratara de los sentidos corporales.

Quizá la máxima virtud del grafismo molecular informatizado resida en su potencial para facilitar la comunicación. Las redes de transmisión de datos a alta velocidad permitirán el examen simultáneo de los últimos resultados en investigación molecular. El vídeo interactivo posibilitará el estudio de la estructura y función molecular. Y simulaciones refinadas, conjuntadas con gráficos realistas, consentirán adquirir la percepción personal del complejo mundo químico que hay en nuestro interior.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MACROMOLECULAR GRAPHICS. A. Olson y D. Goodsell, en *Current Opinion in Structural Biology*, vol. 2, págs. 193-201; abril de 1992.

La edad de oro de la evolución animal

Hace unos 600 millones de años, la evolución animal estalló en creatividad. ¿Ha cambiado acaso el mecanismo de la evolución y no se admiten ya transformaciones fundamentales en los planes corporales de los organismos?

Jeffrey S. Levinton

Lo que fue, eso será. Lo que ya se hizo, eso es lo que se hará; no se hace nada nuevo bajo el sol.

—Eclesiastés, 1:9

Los biólogos admiten que la vastísima diversidad de animales, plantas y otras formas de vida evolucionaron a partir de organismos elementales que aparecieron hace más de tres mil millones de años. Los fósiles más antiguos corresponden a algas simples y otros organismos unicelulares. Dotados de mayor complejidad, los pluricelulares, animales y plantas, surgieron cientos de millones de años después. No parece que el proceso de complejidad creciente haya sido uniforme. La mayoría de los grandes saltos evolutivos ocurrieron de manera súbita y al poco de la manifestación de los primeros organismos pluricelulares, hace unos 600 millones de años, durante el período Cámbrico. Los planes corporales que surgieron, por evolución, en el Cámbrico sirvieron, en su conjunto, de modelos para los planes que podemos observar ahora; y desde entonces no se han prodigado otros nuevos. A imagen de lo acontecido con los automóviles, que todos responden al mismo patrón original de vehículos con cuatro ruedas, los cambios evolutivos que se han producido desde el Cámbrico son variaciones sobre los temas básicos iniciales.

JEFFREY S. LEVINTON es profesor y director del departamento de ecología y evolución de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Se licenció por la Universidad municipal de Nueva York y doctoró por la de Yale. Ha publicado *Marine Ecology* y *Genetics, Paleontology and Macroevolution.*

Se entraña en esa curiosa discontinuidad la más profunda paradoja en que se debate la biología evolutiva. ¿Por qué no han seguido aflorando del caldero evolutivo nuevos planes corporales animales en los últimos cientos de millones de años? ¿Por qué son tan estables los planes antiguos?

Todos los naturalistas, incluido el aficionado esporádico, reconocen los planes de que hablamos. Los organismos pluricelulares más sencillos del reino animal son los cnidarios, dotados de simetría radial y cuerpo constituido por dos capas de tejido; comprende medusas, anémonas y corales. Algo más complejos son los platelmintos: de simetría bilateral, poseen tres capas de tejidos primarios y órganos de los sentidos concentrados en un extremo. Los celomados, que abarcan la inmensa mayoría restante, constan de tres capas corporales y una cavidad en la capa media. Bajo este último grupo, extensísimo, se cobijan el plan corporal de los anélidos (gusanos segmentados), el de los equinodermos (estrellas de mar, holoturias, erizos de mar y otros organismos de simetría pentámera), el plan de los artrópodos (insectos, arañas y crustáceos), el de los moluscos, el de los vertebrados y el de muchos organismos menos conocidos.

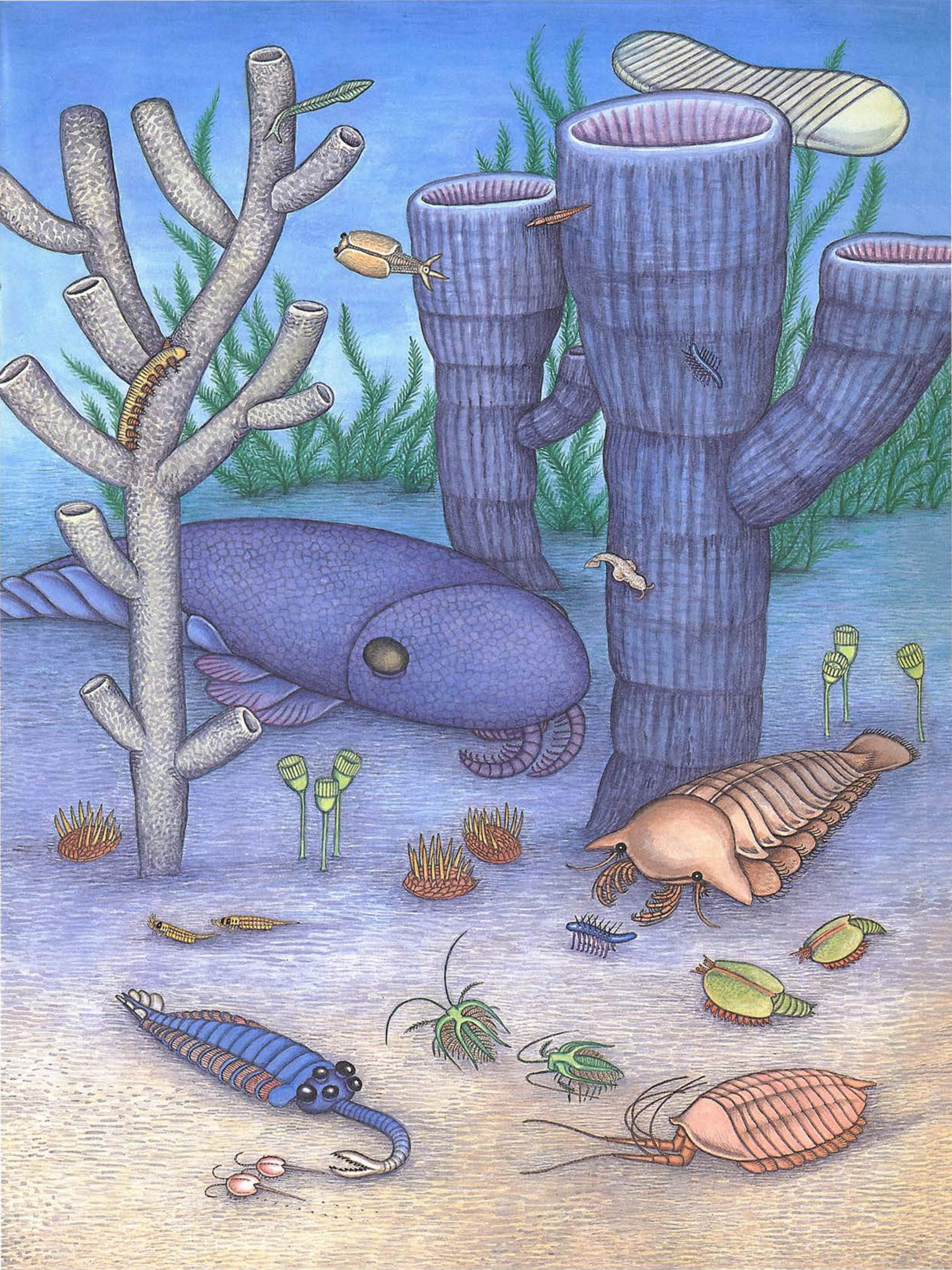
En esas diferencias estructurales se apoyaba el sistema jerárquico mediante el cual los biólogos empezaron a clasificar los animales y las plantas. Equinodermos, artrópodos, anélidos y demás grupos constituyen, cada uno, un tipo o *phylum*, es decir, una división principal del reino Animales. El tipo se define en función del plan corporal distintivo de sus miembros; cada tipo se subdivide, a su vez, en agrupaciones de generalidad decreciente: clases, órdenes y grupos menores, hasta el nivel de especie.

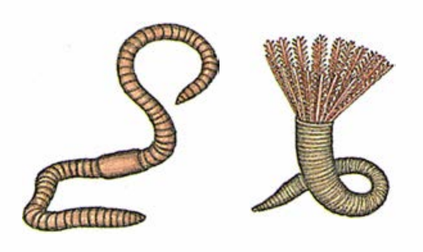
En 1859 Charles Darwin explicó por qué existía esta jerarquía taxonómica en la naturaleza. Advirtió que la evolución constituía un proceso de ramificación, en el que cada punto de ramificación simbolizaba una división de la jerarquía. Los tipos se distinguen por caracteres que reflejan los niveles más antiguos y profundos de la asociación evolutiva.

Todos los *phyla* animales de fácil fosilización conocidos aparecieron en el Cámbrico, período que duró 60 millones de años, sin que podamos precisar en qué momento del mismo surgieron. Ahora bien, si consideramos los 3500 millones de años que abarca la historia biológica y los 570 transcurridos desde el despertar del Cámbrico, será forzoso aceptar que los tipos parecen haber surgido de manera súbita y simultánea. De ahí que ciertos paleontólogos aludan a la "explosión" cámbrica.

Si atendemos al nivel taxonómico situado debajo de los tipos (las clases), resulta manifiesto que el grueso de la innovación básica se desarrolló muy pronto. Richard K. Bambach, del Instituto Politécnico y la Universidad estatal de Virginia, demostró que el número de nuevas clases surgidas después del Cámbrico tardío decreció en picado. Lo que confirma

1. EXPLOSION DEL CAMBRICO, caracterizada por la aparición súbita y contemporánea de muchas formas animales distintas. Ocurrió hace unos 600 millones de años. Ningún otro período de la historia de la vida animal puede parangonarse con ese estallido de creatividad biológica. La mayoría de los organismos del Cámbrico que aquí se ilustran fueron reconstruidos a partir de fósiles por Simon Conway Morris y Harry Whittington, de la Universidad de Cambridge.

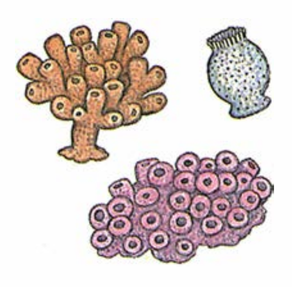




ANELIDOS
GUSANOS SEGMENTADOS



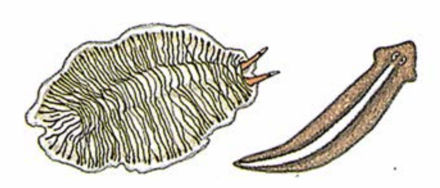
NEMATODOS
GUSANOS REDONDEADOS



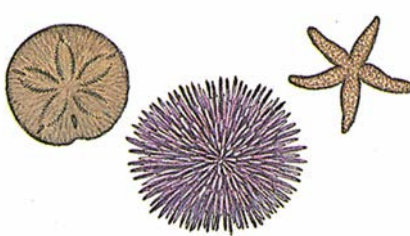
PORIFEROS
ESPONJAS



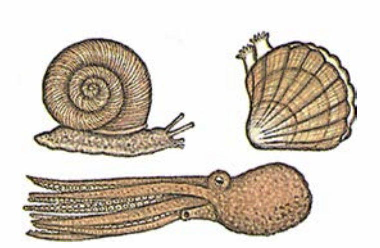
CNIDARIOS
MEDUSAS, CORALES, ANEMONAS DE MAR



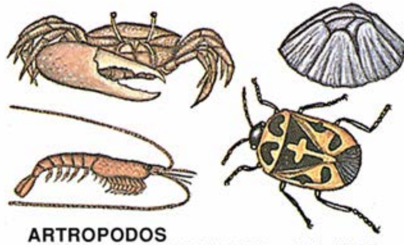
PLATELMINTOS
GUSANOS PLANOS



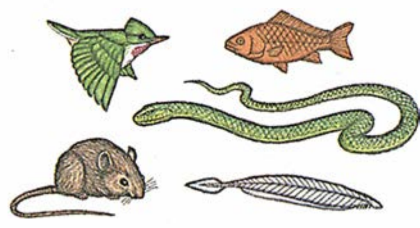
EQUINODERMOS
ESTRELLAS DE MAR, ERIZOS DE MAR, DOLARES DE LA ARENA



MOLUSCOS
ALMEJAS, CARACOLES, PULPOS, CALAMARES



ARTROPODOS
INSECTOS CRUSTACEOS, BALANOS



CORDADOS
PECES, ANFIBIOS, REPTILES, AVES, MAMIFEROS

2. PLANES CORPORALES EXCLUSIVOS, que constituyen el sello distintivo de los *phyla* animales, las categorías taxonómicas superiores. Todos los organismos pertenecientes a un mismo *phylum* comparten ciertas innovaciones evolutivas; la ulterior división de los animales en categorías taxonómicas menores, en especies por ejemplo,

también la espectacular radiación evolutiva del Cámbrico temprano.

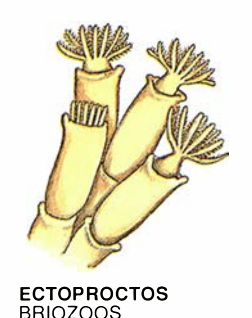
Están todavía borrosos algunos rasgos que describen la explosión del Cámbrico. Así, se cuestiona que el registro fósil diga la verdad sobre el momento en que se originaron los tipos. Cabe, en efecto, la posibilidad de que los progenitores de los diversos grupos animales que vivieron en el Cámbrico se bifurcaran cientos de millones de años antes, sin dejar fósiles, pues quizá carecían de conchas o esqueletos; de ser real esa hipótesis, la diversificación cámbrica no hubiera tenido el carácter explosivo que se le concede.

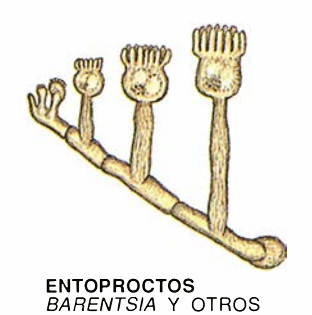
Sobre ese punto existen pruebas contradictorias. Los únicos fósiles que semejan animales y son anteriores al Cámbrico pertenecen a un grupo peculiar descubierto en 1947, en los cerros de Ediacara (Australia meridional), por R. C. Sprigg, y cuya descripción se la debemos a Martin F. Glaessner, de la Universidad de Adelaida. (Desde entonces, se han hallado fósiles similares en otras partes.) La fauna ediacarense, sin embargo, parece constituir, desde el punto de vista evolutivo, un callejón sin salida: no puede relacionarse ni con organismos vivos ni con fósiles del Cámbrico.

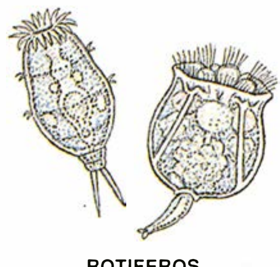
El recurso a las técnicas propias de biología molecular tampoco ha dirimido la cuestión. Sostienen los biólogos que las secuencias de las bases nucleotídicas del ADN y las secuencias aminoacídicas de las proteínas mutan a una cadencia más o menos constante; por cuya razón se emplean dichas secuencias a modo de reloj molecular. Tras comparar las proteínas globínicas en diversos organismos vivos, Bruce Runnegar, de la Universidad de California en Los Angeles, estimó que los animales pluricelulares se dividieron en linajes que insinuaban los principales *phyla* hace, probablemente, más de 900 millones de años, mucho antes del Cámbrico. Mas las pruebas recabadas de la secuenciación del ARN ribosómico 18S (moléculas que intervienen en la síntesis de proteínas), de varias especies, prestan soporte a la hipótesis de una aparición casi simultánea de muchos tipos, lo que acontecería en la segunda mitad de la era precámbrica. Se desconocen la época de origen de cada *phylum* y su exacta relación mutua.

En líneas generales, la conjunción de fenómenos indica una explosión de vida compleja cerca del inicio del Cámbrico, cuyo alcance sólo apreciaremos si nos acercamos al registro fósil con juicio crítico. El muestrario más rico de fósiles del Cámbrico está enterrado en Burgess Shale (Columbia Británica). Sus ejemplares, en notable estado de conservación, fueron descubiertos por Charles D. Walcott, de la Institución Smithsoniana. Creyó Walcott que aquellos especímenes extraños podrían guardar relación con grupos actuales. No opinan así hoy varios paleontólogos, los que defienden que Burgess Shale y otros sedimentos del Cámbrico contienen planes corporales únicos, que florecieron a principios de dicho período y se extinguieron a continuación. Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard, ha divulgado esa idea en *La vida maravillosa.*

Entre esos fósiles insólitos de Burgess Shale podemos mencionar a *Wiwaxia*, un animal espinoso de unos tres centímetros de longitud, descrito con minuciosidad por Simon Conway Morris, paleontólogo de la Universidad de Cambridge. Gracias a la reconstrucción plausible que realizó éste, muchos aceptaron su pertenencia a un tipo enteramente nuevo. Y así hasta que en 1990 Nicholas J. Butterfield, alumno de doctorado en Harvard, examinó *Wiwaxia* y sospechó que se trataba de un pariente de nuestro ratón de mar, un gusano de escamas. Ahon-







refleja la variación sobre estos diseños físicos básicos. Todos los *phyla* que poseen partes duras surgieron durante el Cámbrico. El número total de *phyla* animales es de 26; los que aquí se ilustran representan solamente algunos de los grupos más familiares.

dó en la investigación y comprobó que *Wiwaxia* pertenecía al tipo Anélidos: los ejemplares de *Wiwaxia* presentan los ganchos quitinosos planos que caracterizan a los poliquetos, una subclase de anélidos actuales.

El asunto *Wiwaxia* ha dado un giro de 360 grados: se ha vuelto al concepto inicial de anélido invocado por Walcott. E incluso el más singular de los fósiles de Burgess Shale, que responde al caprichoso nombre de *Hallucigenia*, es, con toda probabilidad, un gusano aterciopelado del tipo Onicóforos; lo acaban de probar L. Ramsköld, del Museo Sueco de Historia Natural, y Hou Xianguang, del Instituto de Geología y Paleontología de Nanjing.

Tomemos otro ejemplo. Durante años, existía la impresión de que los equinodermos del Cámbrico andaban dispersos por diversas clases taxonómicas, surgidas, diríase, todas ellas a la vez y sin ninguna relación entre sí. Idea que están desmoronando los análisis recientes; nos hablan éstos de un árbol evolutivo clásico y no de ningún césped evolutivo formado por muchas raíces conectadas a antepasados comunes desconocidos.

Los casos expuestos denuncian una limitación inherente a las hipótesis sobre evolución que descansan en la clasificación taxonómica. Algunos fósiles que sugieren la existencia de clases únicas son migajas muy pobres de la mesa geológica. Para establecer que un fósil constituye una novedad genuina, el paleontólogo debe razonar su naturaleza exclusiva con los caracteres morfológicos no compartidos por otros grupos. Para determinar que un fósil pertenece a un grupo conocido debemos descubrir los rasgos diagnósticos que confirmen ese parentesco. En el hallazgo inicial de los restos fosilizados de un organismo, por lo común fragmentarios, suelen faltar muchos detalles y, por tanto, resulta muy fácil que se cree un grupo nuevo. Ante el estado fragmentario de muchos fósiles, susceptibles de recibir en cualquier momento otra interpretación, me inclino a pensar que Gould y otros paleontólogos han exagerado la diversidad en ese período geológico. Lo que no impide que reconozcamos la realidad de la explosión cámbrica.

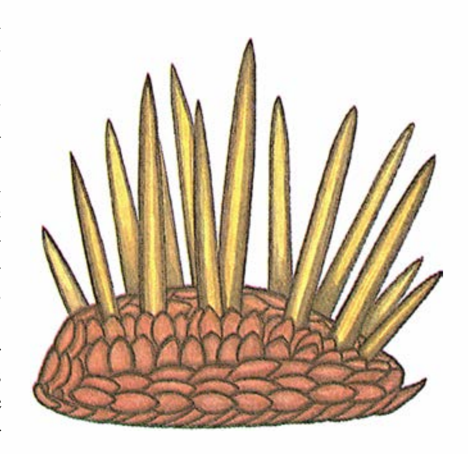
Pero, ¿por qué no han aparecido nuevos planes corporales a lo largo de los últimos quinientos millones de años? James W. Valentine, de la Universidad de California en Berkeley, ha sugerido la posibilidad de que aparecieran y evolucionaran más deprisa nuevas formas en los momentos iniciales de la historia de la vida porque había más "espacio libre", más nichos ecológicos vacíos. No creo yo, sin embargo, que esa razón lo explique todo. En la mayor de las grandes extinciones, ocurrida en las postrimerías del período Pérmico, hace 230 millones de años, y de acuerdo con los cálculos de David M. Raup, de la Universidad de Chicago, desapareció el 96 por ciento de todas las especies marinas. Mas, frente a la hipótesis de Valentine, no existen pruebas de que surgieran planes corporales y tipos enteramente nuevos para ocupar nichos que habían quedado vacantes.

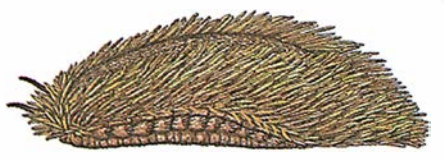
No es menos fácil aceptar que la ocupación de todos los nichos impediría la innovación evolutiva. Observamos cómo hoy planes corporales distintos explotan los mismos recursos: caracoles, gusanos y miembros de otros *phyla* diversos ingieren partículas orgánicas del fango para alimentarse. Urge buscar otros motivos para explicar la escasez de innovaciones biológicas desde el Cámbrico a nuestros días.

Se ha esgrimido que la evolución procede hoy con mayor lentitud que durante la juventud del planeta. Si los procesos evolutivos han frenado el paso por causas que ignoramos, pudiera ser que no haya transcurrido el tiempo necesario para la aparición de nuevos planes corporales.

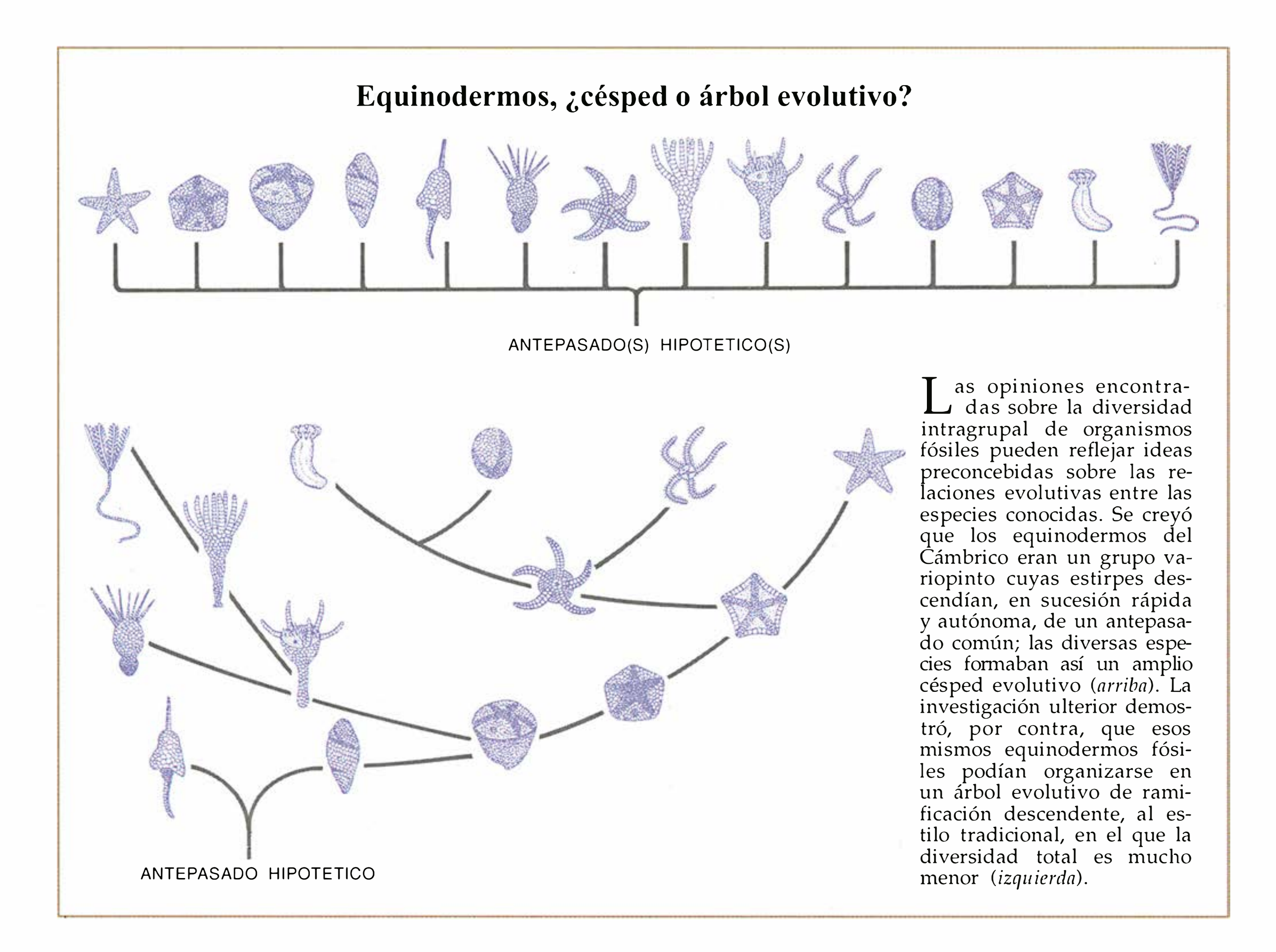
Valía la pena detenerse en esa objeción. Hace diez años decidí con Paul Klerks, de la Universidad de Louisiana Sudoccidental, someter a prueba la hipótesis. Con ese propósito examinamos la tolerancia a los metales de los invertebrados de Foundry Cove, una ensenada del río Hudson. Igual que otros ancones cercanos, Foundry Cove bulle de vida: los zapateros remolinean en la superficie, atrapando incautas ninfas de jejenes; oligoquetos y larvas de insectos se hacinan en el fondo fangoso y proporcionan alimento a peces, cangrejos y quisquillas. Pero Foundry Cove goza de una singularidad: presenta quizá la mayor concentración mundial en cadmio y níquel, que son contaminantes tóxicos.

Al otro lado del río se hallan Storm King Mountain y West Point. La ensenada tiene, pues, una venerable historia militar. Durante la Guerra de





3. *WIWAXIA* (*izquierda*), un fósil espinoso del Cámbrico, se creyó antaño que representaba un tipo desconocido en el mundo actual. Investigaciones recientes han sacado a la luz su relación con el ratón de mar, *Aphrodite* (*derecha*), del tipo Anélidos.



Las opiniones encontradas sobre la diversidad intragrupal de organismos fósiles pueden reflejar ideas preconcebidas sobre las relaciones evolutivas entre las especies conocidas. Se creyó que los equinodermos del Cámbrico eran un grupo variopinto cuyas estirpes descendían, en sucesión rápida y autónoma, de un antepasado común; las diversas especies formaban así un amplio césped evolutivo (*arriba*). La investigación ulterior demostró, por contra, que esos mismos equinodermos fósiles podían organizarse en un árbol evolutivo de ramificación descendente, al estilo tradicional, en el que la diversidad total es mucho menor (*izquierda*).

la Independencia, una herrería (que da nombre al entrante) forjó cadenas que se tendieron a través del Hudson para cerrar el paso a los buques de guerra británicos. Durante la Guerra de Secesión, la fundición preparó municiones. A principio de los cincuenta, la industria militar allí instalada comenzó a fabricar baterías en aquel lugar, y se vertieron más de 100 toneladas de escoria de cadmio-níquel en la ensenada y en el río inmediato, hasta que la oposición de los vecinos obligó a su cierre en los últimos años setenta.

Cuando Klerks y yo estudiamos la ensenada, a principios de los ochenta, descubrimos que el 25 por ciento de los sedimentos del fondo era cadmio, lo que no obstaba para que allí medraran especies de invertebrados bentónicos en cuantía similar a las habitantes en los fondos fangosos sin contaminar de otros lugares. Para determinar la razón del fenómeno, examinamos la tolerancia al cadmio de *Limnodrilus hoffmeisteri*, el invertebrado más común de la ensenada, pariente acuático de la lombriz de tierra.

Los *Limnodrilus* de una ensenada cercana morían o mostraban síntomas evidentes de malestar si los transferíamos a sedimentos de Foundry Cove, en tanto que los ejemplares locales medraban y se reproducían. Mantuvimos gusanos de Foundry Cove en fangos limpios y analizamos sus descendientes de la segunda generación; también ellos eran tolerantes al cadmio, prueba de que dicha tolerancia residía, en buena medida, en los genes.

La evolución hacia la resistencia al cadmio pudo haberse desarrollado en menos de 30 años. Para ser exactos, la variabilidad genética de las poblaciones cercanas, unida a la elevada mortalidad que medimos, indicaban que el grado de tolerancia a los metales detectado pudo haberse adquirido en un par o dos de generaciones (unos dos años). Nos propusimos confirmar la hipótesis: depositamos gusanos de un lugar sin contaminar en sedimento cargado de cadmio y criamos a los supervivientes. A la tercera generación, los descendientes tenían las dos terceras partes de tolerancia al cadmio que encontramos en los gusanos de Foundry Cove.

Nos sorprendió tal capacidad para el cambio rápido ante un estímulo ambiental nuevo. No hay en la naturaleza una población de gusanos que pudiera haberse visto sometida a las condiciones que el hombre creó en Foundry Cove. Y si bien es cierto que algunas especies de los cursos de agua cercanos no viven en Foundry Cove, también lo es que la mayoría se adaptó a unas condiciones insólitas.

Abundando en lo anterior, parece ser un fenómeno generalizado la rápida evolución de la tolerancia a elevadas concentraciones de toxinas. Ante cualquier nuevo plaguicida, siempre aparece, y en pocos años, una estirpe resistente por evolución. Lo mismo ocurre con las bacterias, cuando se introducen nuevos antibióticos. Por suerte para los humanos, les cuesta cara a aquéllas la resistencia a los antibióticos, por lo que vuelven a predominar las cepas sensibles cuando se suspende momentáneamente el uso del fármaco.

Pero no hace falta recurrir a los venenos para demostrar el poder de la selección natural. John A. Endler, de la Universidad de California en Santa Bárbara, trabajando con gupis

de los ríos de Trinidad, ha puesto de manifiesto la forma en que los depredadores instan una evolución rápida. En los tramos superiores, libres de depredadores, las hembras escogen a los machos que poseen una cola espectacular por su gran tamaño y color vivo, señales presumibles de buena salud. Ahora bien, los colores vivos y vistosos constituyen un peligro allí donde abundan los peces depredadores. Endler comprobó el efecto de los depredadores en los gupis depositando a éstos en estanques, con y sin depredadores. En los depósitos con muchos depredadores, escaseaban, a los pocos años, los machos de colores brillantes; en los estanques sin depredadores, multiplicaron su número los machos vistosos.

David N. Reznick y Heather A. Bryga, de la Universidad de California en Riverside, que trabajaban con Endler, demostraron que la selección natural podía alterar rápidamente incluso el programa reproductor del organismo. Echaron gupis en un río libre de depredadores; los nuevos inquilinos empezaron a reproducirse a una edad más avanzada y dedicaron una fracción mayor de sus recursos alimentarios al crecimiento corporal, en vez de invertirla en reproducción. Al aparecer los depredadores merodeando, la selección natural favorecía a los gupis que se reproducían más temprano (antes de que un depredador pudiera atacar) y que extendían su calendario reproductor a muchas estaciones.

Las estructuras corporales pueden evolucionar también muy deprisa, en especial cuando la formación de nuevas islas o lagos crea espacios ecológicos nuevos que están maduros para la invasión. Los pinzones de Darwin, un grupo de especies estrechamente emparentadas de las islas Galápagos, divergieron, se supone, a partir de una misma especie ancestral, en el intervalo de los últimos cinco millones de años o menos. Nuevas especies con pico diferente evolucionaron para aprovechar el vacío ecológico, cada una de ellas especializada en un alimento distinto.

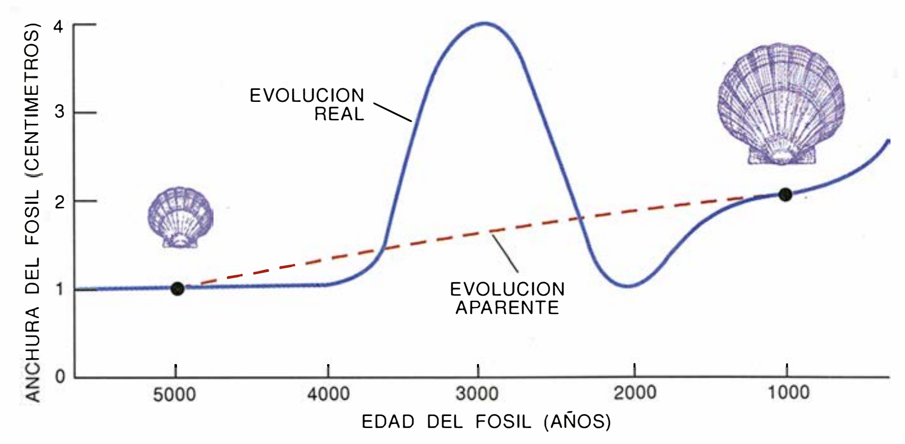
Peter R. Grant y su equipo, de la Universidad de Princeton, comprobaron cuán rápidamente puede actuar la selección natural sobre los pinzones mencionados [véase "La selección natural y los pinzones de Darwin", de Peter R. Grant; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1991]. Una temporada de sequía intensa mató a todas las plantas, salvo las productoras de semillas resistentes a la sequía. Siendo granívoros, sobre todo, los pinzones conocieron una tasa altísima de mortandad. La situación primó el aumento del tamaño medio del pico; los pájaros de pico grande podían cascar semillas mayores. Como observó Grant, las fluctuaciones entre sequía y pluviosidad producían continuas tandas de evolución, frecuentemente en el intervalo de sólo unos pocos meses.

Todos estos estudios sobre grupos de organismos actuales dan fe del vigor de la evolución y del ritmo al que opera hoy en día. El paleontólogo J. John Sepkoski, Jr., de la Universidad de Chicago, ha obtenido un respaldo adicional del mundo fósil. Sepkoski emprendió un esfuerzo titánico: compendiar el registro fósil y catalogar la diversidad de los grupos extintos a lo largo del tiempo. Sus cálculos de las categorías taxonómicas inferiores, del rango de género, ofrecen un criterio, sin duda valioso, para conocer el número de especies durante diversos períodos. Llega a la conclusión siguiente: ha habido períodos durante los cuales el número total de especies permaneció estable y una época, al final de la era paleozoica, en que la cifra bajó en picado. Pero, considerado el tema globalmente, diríase que el número total de especies ha ido aumentando a paso regular durante los últimos 60 millones de años. De lo que se infiere, pues, que no existe la supuesta incapacidad de especiación que se alega para justificar el hecho de que los animales no adquieran nuevos planes fundamentales.

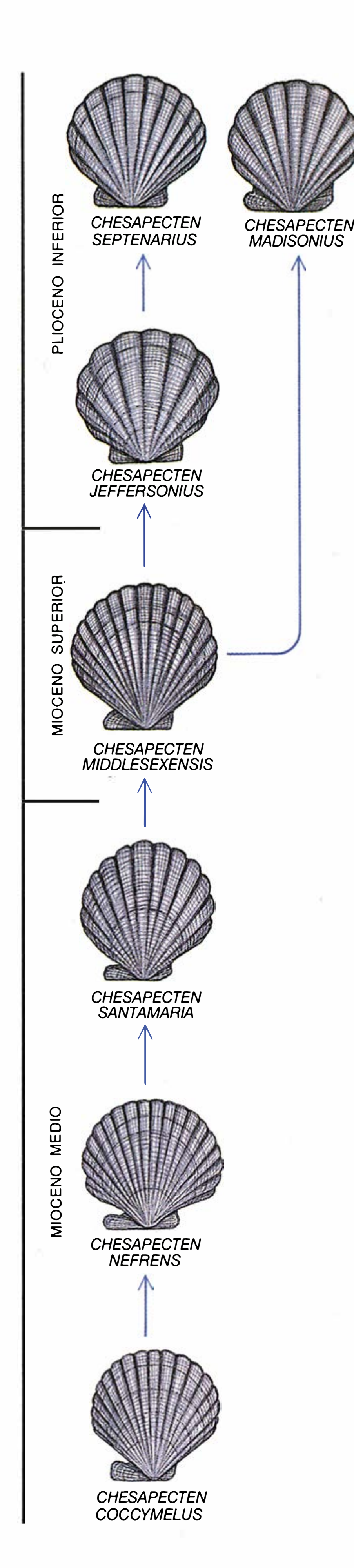
Las pruebas obtenidas de organismos actuales abonan, por consiguiente, la idea de que la evolución contemporánea procede con la celeridad de siempre. Pero si se observa el registro fósil, el ritmo del cambio evolutivo sorprende por su lentitud.

En la playa de Scientists Cliffs, en la bahía de Chesapeake, despuntan unos salientes de arena endurecida que alojan miles de fósiles de organismos que vivieron en un mar somero hace varios millones de años. Hay, entre ellos, un tesoro de *Chesapecten*, conchas de peregrino del Mioceno. Las vieiras *Chesapecten*, nombre que deben a la bahía, se describieron en 1687. Los miembros más antiguos del grupo datan de mediados del Mioceno, hace unos 14 millones de años; *Chesapecten* se extinguió hace unos tres millones de años. La cadena de antecesores y descendientes en los estratos es casi ininterrumpida. Joan Miyazaki, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, ha trazado la historia evolutiva de esos yacimientos fósiles, magnífica y majestuosamente lenta.

Los juveniles de las especies modernas de concha de peregrino presentan, por lo común, una forma triangular marcada por una profunda muesca, atravesada por una "oreja" sedalina que sirve para anclar el animal a su sustrato. Conforme va creciendo, la silueta de la vieira se torna más circular y, menor, la oreja. A lo largo de la mayor parte de sus once millones de años de historia, la estirpe de *Chesapecten* siguió gradualmente esa trayectoria evolutiva: de un animal que se parecía a los juveniles actuales a una forma que se asemeja ya a los adultos de nuestros días. Miyazaki supone que el antiguo mar donde vivieron los *Chesapecten* se ahondó cada vez más, lo que privilegiaría a las vieiras que



4. RITMO DE EVOLUCION Y SU DEPENDENCIA DE LA ESCALA EMPLEADA. La tasa de evolución debe entenderse en el marco de la escala temporal en que se mide, razón por la cual nos parecen tan lentos los cambios evolutivos que observamos en el registro fósil. En este ejemplo hipotético, la lentitud manifiesta de la tasa de evolución de la anchura de un fósil (*rojo*) obedece al agrupamiento de períodos en que no ocurren cambios con períodos de rápidas fluctuaciones.



vivían libres sobre las fijadas a un sustrato. Sin que sepamos por qué, la evolución de los *Chesapecten* procedió con extrema lentitud.

Las transformaciones evolutivas en los moluscos actuales pueden ocurrir más deprisa. Compárese el ritmo de los cambios evolutivos en los *Chesapecten* con los que se dan en la margarita europea, *Nucella lapillus*, y el bígaro chato, *Littorina obtusata*. Estos moluscos se convirtieron en presa del cangrejo común europeo, tras su introducción accidental en las bahías de la costa americana de Maine, presumiblemente en la primera parte de este siglo. Transcurridos escasos decenios, la margarita y el bígaro habían desarrollado conchas más gruesas y fuertes, más resistentes a los ataques de los cangrejos.

George Gaylord Simpson, del Museo Americano de Historia Natural, figura excelsa de la paleontología del siglo XX, encontró una tasa evolutiva igualmente lenta en los mamíferos fósiles. Las zarigüeyas modernas divergen sólo ligeramente de sus antepasados del Cretácico, hace 65 millones de años. Extrapolando la tasa de transformación de la zarigüeya, Simpson razonaba que la evolución de los mamíferos a partir de un antepasado reptiliano "difícilmente habría durado menos de 600 millones de años... lo que es absurdo".

Debemos a J. B. S. Haldane el mejor planteamiento del problema. Revisó el estudio de Simpson de los caballos fósiles y encontró que la altura de un rasgo dentario aumentaba a un ritmo lentísimo, de un 3,6 por ciento cada millón de años. Haldane concluyó que la evolución de los dientes de los caballos procedía con tal lentitud que no podríamos distinguir qué se debía, en ese proceso, a la selección natural y qué a la deriva genética aleatoria. Por eso he bautizado con el nombre de paradoja de Haldane al efecto que nos muestra una evolución rápida en los organismos vivos y un ritmo de transformación lentísimo en el registro fósil.

5. LOS FOSILES DE *CHESAPECTEN* reflejan tendencias uniformes en los cambios evolutivos, que persistieron durante más de 10 millones de años. La forma de estas conchas de peregrino se volvió paulatinamente más redondeada; la muesca que señala su punto de fijación al sustrato se hizo menos pronunciada. Estos cambios corren paralelos a las alteraciones experimentadas cuando las vieiras juveniles maduran. En una estirpe, esa tendencia se detuvo, en tanto que en la otra prosiguió hasta la extinción de tales conchas de peregrino.

La paradoja de Haldane comienza a resolverse en cuanto caemos en la cuenta de que los paleontólogos calculan las tasas evolutivas a lo largo de cientos de miles o de millones de años. Esta escala temporal puede sesgar las tasas detectables de cambio. Supóngase que tenemos que medir el nivel del agua en una costa el día 1 de enero de dos años sucesivos. Aun cuando lleguemos el primer año en marea baja y en marea alta al año siguiente, la tasa de cambio medida sería baja; digamos de un metro por año. En cambio, si tomáramos una medida aproximadamente cada seis horas, la tasa de cambio parecería mucho mayor: un metro cada seis horas, o 1460 metros por año.

A menos que un cambio sea de tasa constante y de dirección uniforme, reviste particular interés la escala temporal que medimos. Las tasas evolutivas medidas sobre períodos geológicos pueden parecer exasperadamente lentas, porque los períodos dilatados abarcan épocas sin cambios y épocas de transformaciones rápidas con frecuentes reversiones.

Insistiendo en esta línea, Peter M. Sadler, de la Universidad de California en Riverside, midió la tasa de deposición de los sedimentos marinos en varios períodos del registro fósil y descubrió que la tasa de acumulación de sedimentos resultaba más baja si se medía a intervalos mayores. Philip D. Gingerich, de la Universidad de Michigan, halló idéntica relación inversa entre escalas de tiempo y tasas manifiestas de evolución. Cuando buscó cambios en especies actuales y fósiles a lo largo de períodos cortos, las tasas fueron muy altas; en períodos más largos, el ritmo evolutivo decreció.

Comparto la opinión de otros muchos paleontólogos sobre la existencia de períodos de cambio evolutivo rápido y frenético que alternan con inversiones y largos períodos de pocos cambios. Los períodos de cambio rápido tienden a perderse entre los resquicios de la escala temporal de los paleontólogos. A este propósito, Michael Lynch, de la Universidad de Oregón, acaba de demostrar que la evolución lenta de los mamíferos obedece, probablemente, a la selección natural en pro de formas intermedias y estables de animales consideradas a lo largo de millones de años.

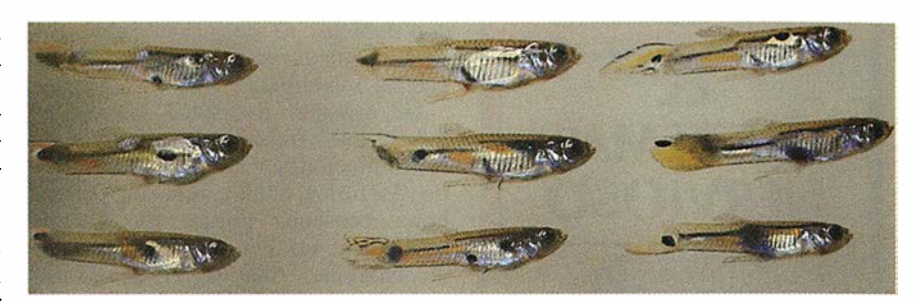
En conclusión, no hay razón para pensar que la tasa de evolución fue antaño más lenta o más rápida que lo es hoy. Pero sigue abierta la pa-

radoja planteada por la explosión del Cámbrico y la misteriosa persistencia de estos antiguos planes corporales. Sostuve antes que la respuesta, en parte al menos, podría estar en la evolución de un compromiso con un programa de desarrollo epigenético.

Las propiedades que reputaríamos esenciales para definir el plan corporal de un grupo pueden resultar indiferentes para describir a sus antepasados, si es que no poseían éstos un plan distinto. C. R. C. Paul, de la Universidad de Liverpool, y B. Smith, del Museo de Historia Natural de Londres, han demostrado que las estrellas de mar no surgieron de las nieblas del Cámbrico en una forma definitiva y permanente. Antes bien, la morfología que conocemos de las estrellas de mar cristalizó durante el Cámbrico, a través de millones de años. Ni siquiera la simetría pentámera de los equinodermos actuales estaba rígidamente establecida en el origen del grupo: le precedió, en los antepasados, una simetría trímera. Cumplió a la selección natural esculpir poco a poco las formas generales que habrían de tener las clases de equinodermos, a partir de sus caparazones y partes blandas.

En resumen, pues, los datos de la observación muestran que los caracteres definidores de un grupo van cuajando, gradualmente, en una condición más estable después de un largo período de plasticidad evolutiva original. En respuesta a las presiones de selección, la evolución podría establecer programas de desarrollo para limitar las modificaciones de los planes corporales que han tenido éxito. Sólo nos cabe imaginar qué mecanismos genéticos podrían establecer permanentemente el desarrollo; en efecto, se descubren cada vez más genes implicados en controles similares de las pautas de desarrollo precoz de especies lejanamente emparentadas. En ese contexto explicativo, el Cámbrico pudo constituir un período en el que se acuñaron los programas genéticos que controlan los planes corporales embrionarios, las formas que conocemos.

La hipótesis de un desarrollo encauzado, o sometido a limitaciones, goza de espléndida salud. Por tratarse de un proceso de exquisita precisión, razonan muchos, el desarrollo no admite sin más un cambio drástico. Las formas mutantes que crean embriones monstruosos no acostumbran a prosperar y mueren muy pronto. En esa hipótesis hallan explicación la diversificación de formas en el Cámbrico y el subsiguiente fracaso en la aparición de nuevos planes corporales después de las extinciones del Pérmico tardío. Da cuenta también de la alta tasa de especiación, tal como la mide Sepkoski: los cambios que corresponden a diferencias entre especies estrechamente emparentadas carecen de constricciones ligadas al desarrollo.





6. EVOLUCION MANIFIESTA DE LOS GUPIS en sólo unas generaciones, ante la necesidad de adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes. Cuando abundan los depredadores, la selección natural favorece a los gupis transparentes y de colores apagados (*arriba*); cuando escasean, los gupis macho tienden a agrandar la cola y avivar su cromatismo, para atraer a las hembras (*abajo*).

Quedan, empero, cabos sueltos. ¿Pueden las limitaciones impuestas al desarrollo justificar la estabilidad de los planes corporales a lo largo de cientos de millones de años? ¿Puede ser cierto que los equinodermos han seguido siendo equinodermos porque la selección natural no puede desarticular su patrón de desarrollo?

Las limitaciones no pueden ser absolutas. A veces se violan las reglas del desarrollo. Las ranas arborícolas proporcionan un ejemplo espectacular [véase "Ranas marsupiales", de Eugenia M. del Pino; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1989]. Todas las ranas adultas tienen aproximadamente la misma forma, pero unas cuantas especies de ranas arborícolas poseen bolsas en cuyo interior ponen huevos insólitamente grandes y repletos de vitelo. Las primeras etapas de la embriología de estas especies difieren de la epigénesis de otras ranas arborícolas para permitir que el embrión se desarrolle sobre un gran huevo en la tierra emergida, y no en el agua.

Esta modificación afecta a la gastrulación, período crítico del desarrollo, durante el cual se determina la identidad futura de los tejidos. "El momento decisivo de la vida de uno no es el nacimiento, ni el matrimonio, ni la muerte, sino la gastrulación", escribió Lewis Wolpert. La posibilidad de subvertir el desarrollo refleja que el embrión, en sus primeras fases, no siempre es impermeable a alteraciones importantes.

En esa dirección apuntan las investigaciones recientes sobre el desarrollo de los equinodermos. Gregory Wray, de la Universidad de Vanderbilt, y Rudolph A. Raff, de Indiana, han sacado a la luz la extraordinaria diversidad de los embriones de erizos de mar. Las larvas de especies estrechamente emparentadas presentan a veces formas muy dispares: unas están adaptadas a una larga vida de natación y alimentación en el plancton, mientras que otras lo están a un corto período en el que no se alimentan mientras son dispersadas por las corrientes. Especializaciones ecológicas que implican diferencias fundamentales en las pautas de desarrollo de las larvas e incluso en zonas del embrión destinadas a convertirse en estructuras del adulto. Muy pocos, sin embargo, serían capaces de percibir diferencias entre los adultos de tales especies: todos poseen un esqueleto ovoideo

con espinas, se desplazan sobre pedicelos tubulares y raspan las rocas con su mandíbula.

De tamaña diversidad hemos de inferir que, frente a la hipótesis de las limitaciones impuestas al desarrollo, la forma adulta hubo de permanecer constante porque dio buenos resultados, no porque fuera incapaz de cambiar. Aunque el desarrollo guíe los pasos de la evolución morfológica, la selección natural podría ser la principal responsable de la persistencia de los caracteres que definen a los *phyla*.

La explosión del Cámbrico continúa, pues, envuelta en el misterio. Es obvio que la supervivencia de los planes corporales que surgieron entonces nos está diciendo algo importante sobre las pautas de la evolución. Partiendo de la hipótesis de una vida cámbrica exuberante, en lo que a formas se refiere, Gould ha atribuido al azar (y no a la selección) la decisión de señalar qué estirpes evolutivas sobrevivirían y cuáles se extinguirían. Pero quizá la fauna del Cámbrico fue menos plural de lo imaginado por Gould y otros. Opinan de este modo Derek E. G. Briggs y Matthew A. Wills, de la Universidad de Bristol, quienes, en colaboración con Richard A. Fortey, del Museo de Historia Natural de Londres, han demostrado que la diversidad morfológica observada en los artrópodos modernos no tiene nada que envidiar a la manifestada por los artrópodos del Cámbrico.

Además, por notable que fuera la evolución de los planes corporales, la transformación operada desde el Cámbrico no se ha quedado atrás. No se puede descartar gratuitamente la posibilidad de que los animales modernos representen un progreso cualitativo con respecto a sus ancestros, si no un refinamiento de los mismos. Darwin criticó, desde un comienzo, la idea de progreso que situaba al hombre en el ápice de la escala evolutiva. Las tendencias progresivas que se observan en el ámbito de un grupo no implican que los organismos resultantes sean superiores a cualesquiera otros que no sean sus propios antepasados. Sin que ello obste para que muchos linajes evolutivos presenten respuestas claras a la aparición de la depredación, a variaciones en el clima y nivel del agua, así como a otros cambios.

Se trata, a mi juicio, de tendencias evolutivas que implican mejoras progresivas ante un acicate del medio. Pensemos en la evolución expansiva de los mamíferos desde los reptiles mamiferianos: tardó más de 100 millones de años en realizarse y muestra un avance hacia un mejor funcionamiento en tierra. La evolución de un paladar secundario redobló el rendimiento de la masticación. Se abandonaron los conos reptilianos elementales, que se sustituían repetidamente a lo largo de la vida, por dientes más complejos que se reponían una sola vez. La propia articulación mandibular cambió de un fulcro a otro; en algunos fósiles de transición, la articulación mandibular reptiliana coexiste con la mamiferiana.

Si comparamos reptiles y mamíferos modernos, parece imposible que la articulación de la mandíbula cambie de un conjunto de huesos al otro sin producirse una mutación extensa y drástica (muy improbable, por ende). El registro fósil revela, contrariamente, la evolución gradual de la mandíbula de los mamíferos a través de formas intermedias. Lejos de negar la importancia de la selección natural, como sostiene Gould, el registro fósil atestigua su penetrante influencia.

Los planes corporales de los *phyla*, tan antiguos y duraderos, ¿constituyen en verdad soluciones óptimas a los problemas de supervivencia y reproducción, soluciones traídas pronto y con presteza por la selección natural antes de cristalizar el desarrollo? ¿Se trata, por contra, de meras combinaciones aleatorias de caracteres ensamblados al azar, en el curso de la historia? Ambas propuestas de explicación encierran parte de verdad. La especiación, o evolución de las especies, prosigue inalterada, pero no parece tener lugar variación en los planes corporales supervivientes. Por razones que nos son desconocidas, nunca habrá quizás en la Tierra otra explosión de diversidad animal como la conoció el Cámbrico temprano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETICS, PALEONTOLOGY, AND MACROEVOLUTION. J. S. Levinton. Cambridge University Press. 1988.

THE EMERGENCE OF ANIMALS: THE CAMBRIAN BREAKTHROUGH. M. A. S. McMenamin y D. L. S. McMenamin. Columbia University Press. 1990.

"METAZOAN PHYLOGENY AND THE CAMBRIAN RADIATION". D. H. Erwin en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 6, n.º 4, págs. 131-134; abril de 1991.

Origen de las lenguas americanas autóctonas

Durante largo tiempo los especialistas se han preguntado cómo se asentaron en el Nuevo Mundo los primeros americanos. La investigación reciente indica que sus numerosas lenguas pertenecen a sólo tres familias lingüísticas

Joseph H. Greenberg y Merritt Ruhlen

Hace poco más de dos siglos, a Sir William Jones, jurista inglés destinado en la India, le impresionaron las curiosas semejanzas que advirtió entre el sánscrito, el griego clásico y el latín. Propuso la hipótesis de que estas lenguas, y probablemente también la céltica y la gótica, habrían "brotado de alguna fuente común, que quizá ya no exista". A esa fuente se le daría, en el siguiente siglo, el nombre de 'protoindoeuropeo' —un protolenguaje que desde aquellas fechas los lingüistas vienen intentando reconstruir.

Jones no reconstruyó ni una sílaba. Según sus propias palabras, basaba sus conclusiones en observar "tanto en las raíces de los verbos como en las formas gramaticales una afinidad mayor que la que pudiera haberse producido por pura casualidad". No echaron en saco roto esta hipótesis evolutiva los estudiosos interesados en las lenguas del Nuevo Mundo. En 1789, sólo tres años después del célebre discurso de Jones, escribía Thomas Jefferson: "Procuro recoger todos los vocabularios que puedo de los indios americanos y de los asiáticos, persuadido de que si alguna vez tuvieron un parentesco común aparecerá éste en sus lenguajes."

Pero aunque los estudiosos decimonónicos identificaron centenares de lenguas americanas y las agruparon en familias lingüísticas, ninguno de ellos se aventuró a establecer la taxonomía más completa que pretendía Jefferson. Antes bien, la explicación tradicional multiplicó las familias hasta que el número de éstas llegó a ser de unas 60 en Norteamérica y alrededor de las 100 en la del Sur, muchas más que las del Viejo Mundo, donde Africa, por ejemplo, solamente tiene cuatro.

Resultados sorprendentes, si consideramos que la diversidad taxonómica tiende a crecer con el tiempo, y los arqueólogos reconocen que el hombre se estableció en el Viejo Mundo mucho antes que en el Nuevo. De acuerdo con la tesis dominante, los humanos modernos aparecieron hace al menos 100.000 años, probablemente en Africa, y no llegaron a América hasta hace unos 12.000 o 20.000 años. ¿Cómo podrían haberse diversificado tanto las lenguas americanas?

La dificultad reclamaba una clasificación más comprensiva. Pero cuando Alfred L. Kroeber y Edward Sapir, a comienzos de nuestro siglo, intentaron reducir las numerosas lenguas americanas a unas cuantas familias más generales, tropezaron con la fuerte oposición de Franz Boas, Pliny Goddard y Truman Michelson, antropólogos prestigiosos. Y no es que éstos dudasen de que hubiese semejanzas entre los grupos de lenguas americanas; lo que ponían en cuestión —y muchos lo cuestionan hoy todavía— era el origen de tales semejanzas. Kroeber y Sapir insistían en que las similaridades dimanaban de una herencia común y eran, por tanto, de índole genética. Boas y sus seguidores, en cambio, las atribuían a la difusión de palabras desde una familia de lenguas hacia otra.

Nuestra investigación confirma la tesis genética. Comparando los elementos más consevadores de los vocabularios de centenares de lenguas nord- y sudamericanas, uno de los autores (Greenberg) concluyó que sólo había tres familias. Como cada una de ellas se muestra más afín a las familias asiáticas que a las otras dos agrupaciones americanas, la tripartición implica que hubo al menos tres migraciones procedentes de Asia. Esta hipótesis halla confirmación en trabajos realizados por antropólogos físicos.

Los tradicionalistas que rechazan nuestra clasificación no ofrecen otra alternativa mejor. Aseguran que, comparando las lenguas dos a dos, en un análisis profundo, llegarán a establecer el sistema verdadero... aunque sea al cabo de 50 o 100 años. No creemos que sea ése el planteamiento idóneo. Para sistematizar una multitud de lenguas —o de minerales, o de animales— se han de comparar éstas en grupo. Además, el enfoque multilateral ha logrado ya éxito. Cuando lo adoptó Greenberg, hace unos 40 años, para clasificar las lenguas africanas, fue rechazado por los tradicionalistas de esta especialidad. Hoy día todos, incluidos tradicionalistas recalcitrantes, aceptan sus resultados.

Quienes comparan las lenguas de dos en dos dejan de lado muchos indicios importantes. Se han descubierto relaciones entre la lengua albanesa y el inglés, no mediante la comparación sistemática de los dos idiomas aislados, sino fijándose en que uno y otro pertenecen a la familia indoeuropea. Y, desde luego, los indoeuropeístas jamás han adoptado un enfoque binario.

Con nuestro método de análisis multilateral se descubren precisamente aquellas relaciones que tienden a

JOSEPH H. GREENBERG y MERRITT RUHLEN cultivan la filología comparada. Greenberg, profesor emérito de antropología y lingüística en la Universidad de Stanford, se interesa por los universales lingüísticos y la clasificación histórica de las lenguas. Ruhlen, investigador independiente que reside en Palo Alto, California, doctor en lingüística por Stanford, ha trabajado en el Proyecto de los Universales Lingüísticos.



1. LA CLASIFICACION DE GREENBERG distribuye las lenguas de América en tres familias. La eskimo-aleutiana (*púrpura*) y la na-dene (*naranja*) pertenecen a los grupos euroasiático y dene-caucasiano del Viejo Mundo (*hemisferio inserto*). La amerindia (*amarillo*) está emparentada con la euroasiática, y fue la primera de estas familias que entró en el Nuevo Mundo, siendo la eskimo-aleutiana la última.

pasar inadvertidas en el análisis binario. Nosotros comparamos centenares de lenguas a la vez —insistiendo más en la extensión que en la profundidad del análisis— mediante el examen de una lista de varios cientos de palabras. Esta lista contiene vocablos que denotan conceptos universales, tales como pronombres personales, partes del cuerpo y aspectos de la naturaleza (el agua y el fuego, por ejemplo). Siendo raro que tales conceptos se adquieran por préstamo, también lo será que su denominación se tome de otra lengua. El idioma inglés sirve de ilustración de esta regla: aunque ha recogido numerosas palabras de muchos otros idiomas, sin embargo la mayor parte de su vocabulario básico se deriva del protogermánico. En inglés *one, two, three, I, mine, father, water* corresponden a *ein, zwei, drei, ich, mein, Vater, Wasser* en alemán.

La comparación de los vocabularios básicos de centenares de lenguas americanas, de ambos hemisferios, le indujo a Greenberg a agrupar las múltiples familias postuladas en tres: eskimo-aleutiana, na-dene y amerindia. Las dos primeras —eskimo-aleutiana en el Artico y na-dene en el Canadá

Innovación lingüística (T'ANA) y familia

Las lenguas hijas del protoamerindio prueban que éste poseía una raíz con sonido parecido a T'ANA, con la significación de 'hijo, vástago'; se vocalizaba de tres maneras para indicar el género. Esta etimología recorre las 11 ramas del amerindio y no está en ningún otro grupo, por lo que da unidad a la familia y la distingue de todas las demás. Las ramificaciones figuran en la primera columna. El almosano-keresiuano y el chibcho-paezano se dividen y ocupan cada uno dos líneas. Todas las lenguas hijas son modernas, salvo la proto-uto-azteca, que está reconstruida.

FAMILIA LINGUISTICA	LENGUA	FORMA	SIGNIFICADO
AMERINDIA	PROTOAMERINDIO	**T'A'NA**	"HIJO, VASTAGO"
almosana	nootka	**t'an'a**	"hijo, chiquillo"
keresiuana	yuchi	**tane**	"hermano"
penutiana	totonac	**t'ána-t**	"nieto"
hokana	coahuilteco	**t'an-pam**	"hijo"
amerindia central	proto-uto-azteca	***tana**	"hija, hijo"
chibcha	miskito	**tuk-tan**	"chico, muchacho"
paezana	warrau	**dani-**	"hermana de la madre"
andina	aymará	**tayna**	"vástago primogénito"
macro-tucana	masaca	**tani-mai**	"hermana menor"
ecuatorial	urubu-kaapor	**ta'ïn**	"hijo, vástago"
macro-caribe	pavishana	**tane**	"mi hijo"
macro-panoana	lengua	**tawin**	"nieto"
macro-ge	tibagi	**tog-tan**	"chica, muchacha"

y el sudoeste de los EE.UU.— eran ya aceptadas desde hacía tiempo, por lo que la innovación consistió en agrupar todas las demás lenguas americanas bajo una sola 'familia amerindia'. Contiene ésta 11 subfamilias, que se distribuyen a través de gran parte de Norteamérica y por toda la América Central y del Sur.

En apoyo de la tesis 'amerindia' adujo Greenberg unas 300 etimologías, o grupos de palabras que, según él, se han formado todas por evolución de un único vocablo ancestral. A los miembros de cada uno de esos grupos se les califica de 'afines' (*cognates*). El trabajo reciente del otro autor (Ruhlen) ha elevado a cerca de 500 el número de etimologías.

Algunas de esas raíces se hallan ampliamente distribuidas, y cuesta entender cómo durante tanto tiempo no se les prestó atención. Sin duda, la principal razón ha sido que cada especialista ha tendido a concentrarse en una familia. De ahí que, aun cuando se encontrasen palabras similares al pasar de una a otra familia, nadie reparara en ello.

Constituye un buen ejemplo la raíz amerindia de sonido aproximado TANA, TINA o TUNA, cuyo significado caía más o menos dentro de la gama "vástago, hijo, hija" (empleamos las mayúsculas para indicar que los sonidos son aproximaciones). A nadie que compare detenidamente los vocabularios de lenguas amerindias de las Américas del Norte y del Sur dejará de impresionarle la frecuencia tan elevada con que aparecen esos términos.

¿Cómo puede explicarse una distribución tan amplia? Podría suponerse que fuesen términos de difusión mundial, como ocurre con las palabras parecidas a "mamá" y "papá". Por desgracia para esta hipótesis, las formas similares a TANA y TUNA, con el significado de "hijo" o "hija", son tan raras fuera de la familia amerindia como abundantes dentro de ella. Esta raíz no sólo vincula internamente la familia amerindia, sino que la diferencia también de las demás familias lingüísticas: es por tanto, según los expertos, innovación amerindia exclusiva.

	SANSCRITO	GRIEGO CLASICO	LATIN	IRLANDES ANTIGUO	GOTICO
llevo	bhár-āmi	phér-ō	fer-ō	bir-u	baír-a
llevas	bhár-asi	phér-eis	fer-s	bir-i	baír-is
lleva	bhár-ati	phér-ei	fer-t	ber-id	baír-ith
llevamos	bhár-āmas	phér-omen	fer-imus	ber-mi	baír-am
lleváis	bhár-atha	phér-ete	fer-tis	ber-the	baír-ith
llevan	bhár-anti	phér-ousi	fer-unt	ber-it	baír-and

2. VESTIGIOS VERBALES DE UN ANTEPASADO COMUN, que indujeron a William Jones, jurista inglés del siglo XVIII, a reunir estas cinco lenguas antiguas en una familia, la indo-europea. El inglés es un pariente muy próximo del gótico.

La reciente investigación de Ruhlen parece explicar por qué varía la primera vocal de dicha raíz y por qué está tan generalizada su utilización tanto en palabras diferenciadas por el género (hijo/hermano e hija/hermana) como en la forma neutra (criatura/vástago). La razón es que en el protoamerindio, lenguaje del que se derivan todas las lenguas americanas modernas, había tres modalidades, grados o formas de la raíz en cuestión, en las cuales la primera vocal era la que señalaba el sexo: así existían T'ANA "criatura, vástago", T'INA "hijo, hermano, muchacho" y T'UNA "hija, hermana, muchacha". (El apóstrofe representa una oclusión glótica tras la "T".)

Como no podía menos de ocurrir, durante los 12.000 o más años transcurridos desde que comenzara la división del lenguaje amerindio en subfamilias, se ha perdido en muchos casos la correlación entre la vocal inicial y el género originario. De ahí que muchas formas claramente afines con otras muestren ahora una vocal "errónea". Un ejemplo de esto es el protoalgonquino **tāna* ("hija"), cuya primera vocal es **ā* en vez de **ū*. (El asterisco indica que la forma ha sido reconstruida a par-

LENGUA	FORMA	SIGNIFICADO
PROTOAMERINDIO	**T'I'NA**	"HIJO, HERMANO, CHICO"
yurok	**t^{s}in**	"varón joven"
mohawk	**-'tsin**	"macho, muchacho"
molale	**pnē-t'in**	"mi hermano mayor"
yana	**t'inī-si**	"crío, hijo, hija"
cuicatec	**'dííñó**	"hermano"
changuena	**sin**	"hermano"
milcayac	**tzhœng**	"hijo"
tehuelche	**den**	"hermano"
tiquie	**ten**	"hijo"
mocochi	**tin-gwa**	"hijo, muchacho"
yagua	**dēnu**	"vástago macho"
tacana	**u-tse-kwa**	"nieto"
guato	**china**	"hermano mayor"

LENGUA	FORMA	SIGNIFICADO
PROTOAMERINDIO	**T'U'NA**	"HIJA, HERMANA, CHICA"
Coeur d'Alene	**tune**	"sobrina"
yuchi	**t^{s}'one**	"hija, hijo"
miwok (Sierra Central)	**tūne-**	"hija"
salinán	**a-t'on**	"hermana menor"
taos	**-t'út'ina**	"hermana mayor"
lenca	**tuntu-rusko**	"hermana menor"
cayapa	**t^{s}uh-ki**	"hermana"
tehuelche	**thaun**	"hermana"
tiquie	**ton**	"hija"
morotoko	**a-tune-sas**	"muchacha"
nonuya	**-tona**	"hermana"
tacana	**-tóna**	"hermana menor"
piokobyé	**a-ton-kä**	"hermana menor"

tir de las lenguas modernas derivadas.) Lo más probable es que esta discrepancia se deba a la asimilación, por la primera vocal, del timbre de la segunda, o bien a que la forma *a-* de la raíz se ha extendido analógicamente por todo el lenguaje a expensas de las formas *i-* y *u-*. Tal extensión por analogía es común en la historia lingüística.

Merece notarse que las vocales *i* y *u* propuestas para estos términos de parentesco masculino y femenino coinciden con el sistema de los géneros en los dos principales subgrupos amerindios de Sudamérica y también con el de la lengua chinuk de Oregón. Estas coincidencias son demasiado numerosas para ser casuales y están demasiado extendidas para que reflejen meros préstamos lingüísticos; ciertamente muchas de ellas caen en distintos lados de claras discontinuidades geográficas.

Así como a Jones le impresionó el engarce de raíces y afijos, así también encontramos en el amerindio un no menos sorprendente ligamen de la raíz en cuestión con afijos gramaticales. Entre los que pueden modificar la raíz T'ANA figuran los prefijos pronominales *na-* ("mi") y *ma-* ("vuestro/vuestra"), ambos presentes sin excepción en los 11 subgrupos del amerindio. El primero aparece en formas tales como el proto-algonquino **ne-tāna* ("mi hija"), el kiowa *nō-tōn* ("mi hermano"), el paezo *ne-tson* ("mi cuñado") y el manao *no-tany* ("mi hijo"). Estos afijos pronominales son de los elementos más estables del lenguaje: casi nunca proceden de préstamos. Y resulta inconcebible que pudiesen haberse transmitido sistemáticamente conjuntos enteros de ellos de una lengua a otra vecina, y así desde la Columbia Británica hasta la Tierra del Fuego.

Entre los sufijos amerindios hay formas diminutivas que naturalmente se asocian a las palabras que denotan a los niños. El diminutivo protoamerindio **-i'sa* se halla en el protoalgonquino **ne-tān-ehsa* ("mi hija"), en el mixteco *tá'nù i'sá* ("hermana pequeña"), en el esmeralda *tini-usa* ("hija") y en el suhin *tino-ice* ("mujer joven"). Asimismo, el diminutivo protoamerindio **-mai* lo encontramos en el luiseño *tu'mai* ("hijo de la hija de la mujer"), en el masaca *tàni-mai* ("hermanita pequeña") y en el chapacura *tana-muy* ("hija").

El protoamerindio desplegó un intrincado sistema de sufijos. Uno de éstos, **-ki*, indicaba una relación recíproca, por ejemplo, que una misma palabra signifique tanto el hijo de la hermana de un hombre como el hermano de la madre del muchacho. Este sufijo —así como las diversas raíces a las que se une— ha sido reconstruido para el protosiuano en la forma **-thã-ki* ("hermana del hombre"), y se encuentra en lenguajes modernos tales como el pawnee (*t'i-'i*, "muchacho, hijo"), el pomo meridional (*t'i-ki*, "hermanito pequeño"), el mazahua (*t'i-'i*, "muchacho"), el amaguaje (*-tsen-ke*, "hijo") y el aponegicrano (*-thon-ghi* "hermana").

La clasificación de las lenguas en tres grandes grupos implica que no fueron más de tres las migraciones procedentes de Asia que dejaron rastros lingüísticos. Tal vez hubiera incluso menos siempre que ellas dieran origen a comunidades que se fraccionaran por el lado este del estrecho de Bering. Para precisar el número de migraciones, se han de establecer comparaciones entre las familias de lenguas de América y las de Asia.

Los recientes trabajos de lingüistas americanos y rusos indican que, con gran probabilidad, hubo exactamente tres migraciones. El eskimo-aleutiano es el miembro más oriental de una vasta familia que nosotros llamamos euroasiática y los especialistas rusos denominan nostrática. (Las dos clasificaciones se diferencian ligeramente. La euroasiática incluye el indoeuropeo, el uralo-yukaghiro, el turco, el mongol, el tungusio, el coreano, el japonés, el ainú, el gilyako, el chuchi-kamchatkano y el eskimo-aleutiano. La nostrática es más amplia, pues comprende también la familia dravidiana del sur de la India, la familia kartvelia del Cáucaso y la familia afroasiática del norte de Africa y el Oriente Medio.)

Hace muy poco descubrieron parientes asiáticos de la lengua na-dene Sergei Starostin, del Instituto de Estudios Orientales, Sergei Nikolaev, del Instituto de Estudios Eslavos de Moscú, y John Bengston, lingüista independiente que trabaja en Mineapolis. Starostin empezó relacionando tres familias del Viejo Mundo, reputadas independientes hasta entonces: la caucásica, la chino-tibetana y la yeniseiana (familia ésta de la Siberia central de la que sólo sobrevive una lengua). Nikolaev demostró luego que la na-dene tenía un inconfundible parentesco con la caucasiana —reconstruida por Starostin

y él mismo—, y de ahí, por extensión, con la chino-tibetana y la yeniseiana también.

En una comparación más totalizadora de todas las familias implicadas, Bengston añadió a esta familia, que ha venido a denominarse 'denecaucasiana', el vascuence (lengua aislada del norte de España) y el burushaski (lengua aislada del norte del Pakistán). La na-dene resulta ser la extensión más oriental de la denecaucasiana. Y siendo esta familia distinta de la euroasiática, la na-dene no podría haberse desgajado de la eskimo-aleutiana en el hemisferio occidental, sino que tuvo que llegar a América en otra oleada migratoria.

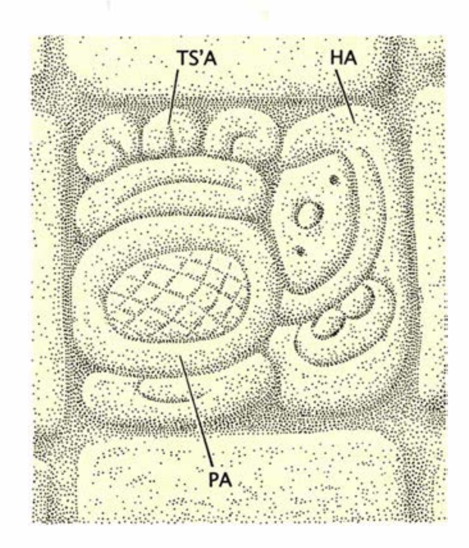
A lo largo de estos últimos años hemos estado comparando la amerindia con las demás familias lingüísticas del mundo, y hemos podido comprobar que guarda una relación más estrecha con la euroasiática. Ciertamente, la relación taxonómica es lejana: mientras la eskimo-aleutiana es un miembro de la familia euroasiática, la amerindia está relacionada, en nivel de paridad, con la euroasiática. Es decir, su conexión genética se remonta mucho más atrás en el tiempo.

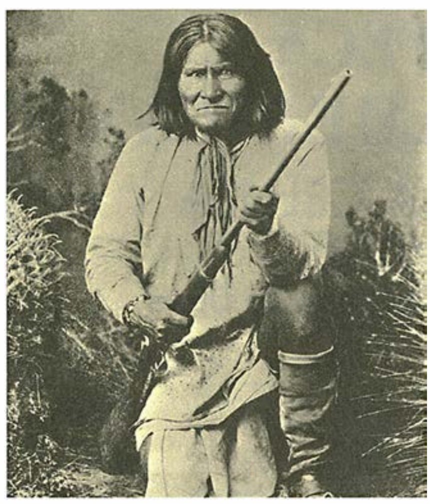
La primera migración ocurrió, según los indicios arqueológicos, hace poco más de 12.000 años. Dio origen a la familia amerindia, que ocupaba la mayor parte del Nuevo Mundo cuando arribó allá Colón en 1492. La segunda migración, algo posterior, engendró la familia nadene. Por último, hará unos 4000 o 5000 años, tuvo lugar la última migración, que llevó a los antepasados de esquimales y aleutianos primero al sudoeste de Alaska y después, bordeando las costas septentrionales de Norteamérica, hasta Groenlandia.

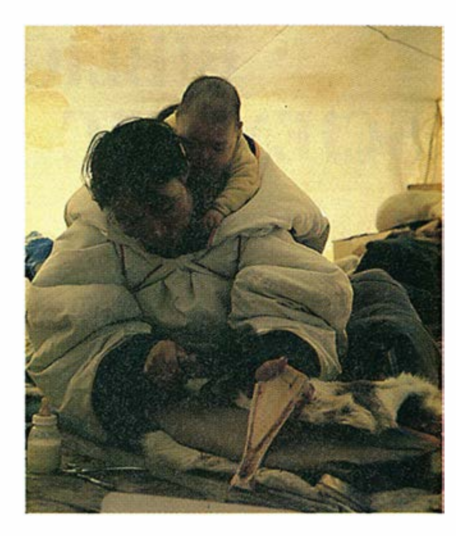
Una sola etimología puede ilustrar la unidad de la familia amerindia y sus vinculaciones con la constelación euroasiático-nostrática. La raíz protoamerindia MALIQ'A, que significa "gaznate, garganta", ha dejado su marca en no menos de ocho de las 11 subfamilias amerindias desde el Canadá hasta el extremo inferior de Sudamérica. En la familia salish del Canadá encontramos el término halkomelem *məlqw* ("garganta"). Bajando por la costa de Oregón hallamos en tfaltik, lenguaje extinto de la subfamilia penutiana, el vocablo *milq*, que significa "gaznate". En yuman, subgrupo de la subfamilia hokana, esta raíz ha llegado a ser el término general para designar "garganta". En Arizona encontramos el mohave *mal^{y}aqe* ("garganta"), mientras que el

FAMILIA LINGUISTICA		LENGUA	FORMA	SIGNIFICADO
AFROASIATICA		proto-afroasiático	***mlg**	"chupar, mamar; teta, ubre"
		árabe	**mlj**	"chupar la teta, mamar"
		antiguo egipcio	**mnd^y**	"pecho de la mujer, ubre"
INDOEUROPEA		proto-indoeuropeo	***melg-**	"ordeñar"
		inglés	**milk**	"ordeñar; leche"
		latín	**mulg-ēre**	"ordeñar"
URALICA		proto-ugrofinés	***mälke**	"pecho"
		saami	**mielga**	"pecho"
		húngaro	**mell**	"pecho"
DRAVIDIANA		tamil	**melku**	"mascar"
		malayalam	**melluka**	"mascar"
		kurux	**melkhā**	"garganta"
ESKIMOALEUTIANA		yupik central	**melug-**	"sorber, chupar"
AMERINDIA		protoamerindio	***maliq'a**	"tragar, garganta"
	almosana	halkomelem	**məlqw**	"garganta"
		kwakwala	**m'lXw-'id**	"mascar alimento para el bebé"
		kutenai	**u'mqolh**	"tragar, engullir"
	penutiana	chinuk	**mlqw-tan**	"carrillo, mejilla"
		takelma	**mülk'**	"tragar, engullir"
		tfaltik	**milq**	"tragar"
		mixe	**amu'ul**	"chupar, sorber"
	hokana	mohave	**mal^{y}aqé**	"garganta"
		walapei	**malqi'**	"garganta, cuello"
		akwa'ala	**milqi**	"cuello"
	chibcha	cuna	**murki-**	"tragar, engullir"
	andina	quechua	**malq'a**	"garganta"
		aymará	**mal^{y}q'a**	"tragar; garganta"
	macro-tucana	iranxé	**moke'i**	"cuello"
	ecuatorial	guamo	**mirko**	"beber; trago"
	macro-caribe	surinam	**e'mōkï**	"tragar"
		faai	**mekeli**	"cogote"
		kaliana	**imukulali**	"garganta"

3. VINCULACIONES CON EL VIEJO MUNDO puestas de relieve en la etimología de la antiquísima raíz MALIQ'A, que significaba algo así como "gaznate" o "garganta". Aparecen afinidades en ocho ramas amerindias y en más de una lengua de cada una de las familias del Viejo Mundo aquí enumeradas. Es inverosímil que esas coincidencias se deban al azar.







4. LENGUAS Y PUEBLOS AUTOCTONOS DE AMERICA forman dos árboles genealógicos correlacionados, basado el uno en etimologías y el otro en genes. Ejemplo de hablantes amerindios son los mayas, que tallaron este glifo hace más de 1000 años para expresar *ts'apah*, con el significado de "se erigió" (*izquierda*). Entre los hablantes de la familia na-dene se cuentan los apaches, dirigidos en el siglo XIX por el célebre indio Gerónimo (*centro*). Los eskimo-aleutianos, como estos inuit del Territorio Noroeste del Canadá (*derecha*), se extienden desde Siberia hasta Groenlandia.

akwa'ala, en la Baja California, tiene *milqi* ("cuello"). En Panamá, el cuna posee la voz *murki* ("gaznate"), donde la *l* originaria parece haberse transformado en *r*, cambio éste muy común. En la subfamilia andina, la lengua quechua utiliza *malq'a* ("garganta"), y en la subfamilia ecuatorial hallamos *mirko* ("trago") en lenguaje guamo.

¿Cuál es la probabilidad de que estas formas similares surgieran independientemente unas de otras? Puede intentarse una grosera estimación ateniéndose a la significación de la estrecha gama semántica "gaznate-garganta-tragaderas" y haciendo unas cuantas suposiciones fonológicas. Empecemos por considerar la probabilidad de que las formas del halkomelem y del tfaltik se pareciesen entre sí casualmente. Prescindiendo de las vocales por ser menos estables que las consonantes, calcúlense las probabilidades de que las tres consonantes coincidieran por casualidad. A continuación, limítense ambos lenguajes exclusivamente a las siguientes consonantes: *p, t, t', k, k', q, q', s, m, n, l, r, y, w*. Acéptese sólo la *m* como primera consonante, *l* o *r* como segunda y *k, k',q, q'* como tercera consonante.

En tales supuestos, las probabilidades de una coincidencia casual son (1/13)(2/13)(4/13) = 0,0036413291. Si redondeamos esta cifra a 0,004 y calculamos la probabilidad de una semejanza aleatoria entre seis familias, obtendremos $(0,004)^5$ = 0,000000000001024, o sea, alrededor de una probabilidad en un billón de casos. Estos cálculos suponen igual probabilidad para todos los tipos de consonantes; como tal hipótesis es gratuita, la cifra real será algo mayor, pero se mantendrá en el mismo orden de magnitud infinitesimal. Olvidemos, pues, las similitudes casuales.

Volvamos ahora a la cuestión de si esta raíz puede encontrarse en el Viejo Mundo. Como vimos anteriormente, en el caso de T'ANA "vástago, hijo", no hay garantía alguna de que los elementos difundidos en la familia amerindia vayan a encontrarse fuera de ella. En cambio, en este otro caso, se hallan formas emparentadas con esa raíz dispersas por el Viejo Mundo. Los primeros nostraticistas rusos, Vladislav Illich-Svitych y Aaron B. Dolgopolsky (éste en la Universidad de Haifa), reconstruyeron la raíz nostrática **mälgi* ("mamar, amamantar"). Esta raíz conecta con la proto-afroasiática **mlg* ("chupar el pezón de la teta") —como *mlj* en árabe—, con la proto-indoeuropea **melg-* ("chupar teta, ordeñar"), así como con el inglés *milk* ("leche, mamar, ordeñar") y con el proto-ugrofinés **mälke* ("pecho"), semejante al saami *mielgâ*. Nosotros hemos encontrado formas afines en eskimo-aleutiano, tales como el yupik central *melug-* ("chupar, mamar"). Por último, la familia dravidiana presenta afinidades evidentes en formas como el kurux *melkhā-* ("garganta") y el tamil *melku* ("mascar").

La gama de significaciones desplegada por estas familias sugiere que el más antiguo ascendiente de tal raíz significaba "mamar, chupar el pezón de la teta", significado que ha perdurado en la afroasiática. En la indoeuropea hubo un ligero desplazamiento semántico desde la noción de amamantar hacia la de ordeñar, mientras que la lengua urálica manifiesta un cambio diferente, hacia el nombre "pecho". En la dravidiana la significación ha pasado a ser "mascar", conexión semántica natural para quien haya observado cómo maman los bebés, y también "garganta". En la eskimo el significado ha venido a ser "chupar" en general, sin especial referencia al pecho de la hembra. Finalmente, en la amerindia esta raíz se convirtió en el vocablo común para decir "gaznate" y "garganta".

En 1988, poco más de un año después de su primera enunciación, la hipótesis amerindia recibió un inesperado apoyo. Un equipo de genetistas dirigido por L. L. Cavalli-Sforza, de la facultad de medicina de la Universidad de Stanford, descubrió que los aborígenes de América se repartían con claridad en tres grupos distintos cuyas delimitaciones coincidían esencialmente con las de sus respectivas familias lingüísticas. Esta independiente confirmación corrobora en la práctica la validez de la familia amerindia, ya que la probabilidad de una coincidencia casual entre las clasificaciones biológica y lingüística es, sin duda, nimia.

Existe, además, una tercera línea de pruebas que respalda la clasificación tripartita de los aborígenes americanos. Christy G. Turner II, de la Universidad estatal de Arizona, especialista en dentición humana, ha descubierto mediante el examen de sus dentaduras que los pobladores del

Nuevo Mundo se repartían en los mismos tres grupos. Finalmente, en 1990, Douglas C. Wallace, de la Universidad de Emory, dio a conocer los primeros resultados del análisis del ADN mitocondrial de las poblaciones aborígenes de América, y este análisis parece apoyar también la hipótesis amerindia.

Debemos apresurarnos a añadir que la estrecha correspondencia advertida entre la clasificación biológica y la lingüística no significa que los genes determinen la lengua que se habla. Esta depende solamente de la comunidad en que uno se cría. Si las clasificaciones coinciden es porque los procesos que condujeron a la divergencia lingüística son los mismos que originaron la divergencia genética. Cuando un grupo de gente sale de su terruño natal y se traslada, por ejemplo, a una isla lejana, se lleva consigo su idioma y sus genes. A partir de entonces, su idioma y su acervo genético se irán diversificando con respecto a los del grupo que dejaron atrás. A esto se debe la armoniosa correspondencia entre ambas clasificaciones.

La filología comparada nos muestra que los pobladores de las Américas llegaron desde Asia en tres grandes oleadas migratorias. Quedan todavía, por supuesto, muchos problemas sin resolver, entre ellos el de cómo empezaría a dividirse la familia amerindia para dispersarse por todo el continente. Sin embargo, los recientes descubrimientos satisfacen, al menos en parte, la esperanza de Jefferson de que algún día saldrían a la luz las relaciones entre las lenguas autóctonas de América, revelando así los orígenes asiáticos de los primeros americanos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SETTLEMENT OF THE AMERICAS: A COMPARISON OF LINGUISTIC, DENTAL, AND GENETIC EVIDENCE. Joseph H. Greenberg, Christy G. Turner II y Stephen L. Zegura en *Current Anthropology*, vol. 27, págs. 477-497, 1986.

LANGUAGE IN THE AMERICAS. Joseph H. Greenberg. Stanford University Press, 1987.

THE AMERICAN INDIAN LANGUAGE CONTROVERSY. Joseph H. Greenberg en *Review of Archaeology*, vol. 11, n.º 2, págs. 5-14, otoño 1990.

A GUIDE TO THE WORLD'S LANGUAGES, vol. 1: CLASSIFICATION. Merritt Ruhlen. Stanford University Press, 1991.

EVOLUTION OF HUMAN LANGUAGES. Dirigido por John Hawkins y Murray Gell-Man, Addison-Wesley, 1992.

Bomba de protones de la membrana vegetal

Las células de plantas y hongos contienen en su membrana plasmática una ATPasa que opera como bomba de protones. La enzima desempeña un papel crucial en la regulación de la concentración de protones y en el transporte de otros iones

Ramón Serrano y José Manuel Villalba

Las células de las plantas y de los hongos se caracterizan, entre otras peculiaridades, por su membrana plasmática. Una forma gráfica de expresar la función de la misma es la de imaginarla como un recipiente o tubo de ensayo de las células donde quedan confinados todos los reactivos químicos en continua transformación metabólica. La química de los seres vivos evolucionó probablemente a partir de reacciones en solución que, luego, se mantuvieron encerradas en una membrana lipídica (la membrana plasmática lo es); ello redoblaría el rendimiento de las rutas metabólicas al evitar la dilución de las moléculas reaccionantes.

Mas, por constituir una barrera contra la permeabilidad, la membrana plasmática planteó sus propios problemas. Según John Raven, de la Universidad escocesa de Dundee, la generación de ácidos por el metabolismo anaerobio de las células primitivas tendería a acidificar el medio interno celular. Por tanto, el desarrollo de una enzima capaz de expulsar protones (H^+) suponía una ventaja evolutiva. Y eso ocurrió con la ATPasa, anclada en la membrana y capaz de expulsar protones a costa de la hidrólisis del trifosfato de adenosina (ATP). Esta bomba primitiva de protones sería el origen de todas las demás ATPasas posteriores, preparadas ya para transportar sodio, potasio y calcio. Los hongos y las plantas poseen en su membrana plasmática una ATPasa bombeadora de protones que podría derivar de esa ATPasa originaria postulada.

La composición del medio intracelular se caracteriza por altas concentraciones de iones potasio y magnesio y bajas concentraciones de iones sodio, cloro, hidrógeno y calcio. El medio externo, por contra, posee altas concentraciones de Na^+, Cl^-, H^+ y Ca^{2+} y bajas concentraciones de K^+ y Mg^{2+}.

Probablemente, la vida surgió en un nicho especial rico en iones potasio y magnesio; y sólo cuando se dispuso ya de membrana plasmática, la vida pudo desarrollarse en otros entornos químicos. Pero esto último requería diversos sistemas de transporte de iones y nutrientes para mantener constante el medio interno y para acumular las fuentes de energía, de carbono, de nitrógeno y otros. Según Raven, las ATPasas surgidas en el curso de la evolución para evitar la acumulación de ácidos metabólicos pudieron haber extendido su función en el sentido siguiente: intervenir en la aportación de energía necesaria para acometer los transportes activos de iones y nutrientes acoplados al gradiente primario de protones. Ambas misiones, la regulación del *p*H y la energización de transportes activos, permitirían la supervivencia de las células en medios adversos.

La existencia de una ATPasa bombeadora de protones en la membrana plasmática de las células vegetales se puso de manifiesto, en los años setenta, mediante experimentos electrofisiológicos realizados en diversos laboratorios. Merece citarse el de Erasmo Marré, de la Universidad de Milán, quien utilizó fusicoccina. Esta fitotoxina, convertida hoy en herramienta clásica en el campo, es un terpenoide producido por el hongo patógeno *Fusicoccus amygdalus* que activa fuertemente la ATPasa de la membrana en todo tipo de tejidos vegetales. Su toxicidad se basa en que, al activar permanentemente la ATPasa de los estomas, éstos se hallan siempre abiertos y la planta pierde excesiva agua.

El grupo de Marré demostró que, al añadir fusicoccina a secciones de órganos vegetales, se detectaba simultáneamente la acidificación del medio (medida con un electrodo de *p*H) y la hiperpolarización de las células (medida con un electrodo potenciométrico celular). Los registros sugerían que la fitotoxina activaba una bomba que expulsaba protones, hacia el medio extracelular, como cargas eléctricas positivas no compensadas, es decir, una bomba electrogénica. Esta dependía del metabolismo energético (fermentación y

RAMON SERRANO y JOSE MANUEL VILLALBA trabajan en aspectos complementarios del artículo que aquí desarrollan. Serrano es catedrático del departamento de biotecnología de la Universidad Politécnica de Valencia, tras haber pasado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el Instituto de Tecnología de Massachusetts y el Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg (EMBL). Su línea de investigación se centra en los sistemas de transporte de iones de hongos y plantas. Villalba, becario posdoctoral en el EMBL, se dedica a la inmunolocalización y expresión heteróloga de proteínas de membrana.

1. CIRCUITOS QUIMIOSMOTICOS de las células eucariotas. Divergen según hablemos de células vegetales o animales. En las células vegetales y también en hongos y muchas algas, hay una ATPasa que bombea protones, mientras que en las células animales la ATPasa bombea sodio y potasio. En el primer caso, los transportes activos secundarios se encuentran acoplados a la entrada de protones; en el segundo están acoplados a la entrada de sodio. En el caso del potasio el transporte activo secundario se halla acoplado al potencial eléctrico. La ATPasa bombeadora de protones de plantas, algas y hongos es el objetivo del presente artículo.

X

H$^+$

H$^+$

K$^+$

Y

H$^+$

+ + + +

+ + + +

H$^+$

H$^+$

X

ATP

H$^+$

ADP + Pi

K$^+$

Y

CELULA VEGETAL

X = AZUCARES, AMINOACIDOS, PURINAS, ETC.

Y = CALCIO, SUCCINATO, LACTATO, ETC.

Na$^+$

X

3 Na$^+$

2 K$^+$

Na$^+$

Y

+ + + +

+ + + +

X

Na$^+$

ATP

ADP + Pi

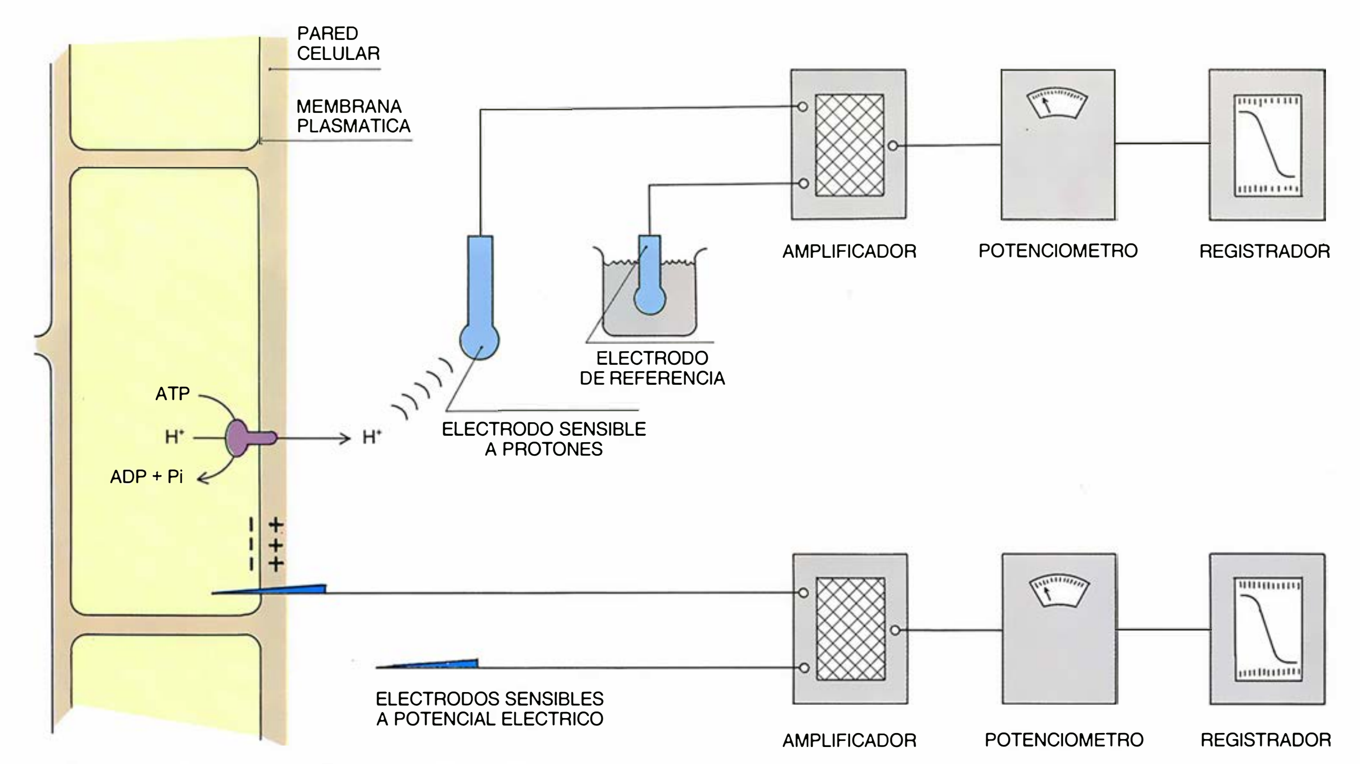
Na$^+$

Y

3 Na$^+$

2 K$^+$

CELULA ANIMAL



2. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES DIVERSAS recibieron explicación tras admitir la existencia de una ATPasa bombeadora de protones en la membrana plasmática de las células vegetales. En el esquema se ilustra el diseño experimental ideado para medir la salida de protones con un electrodo extracelular sensible a esos iones y para medir el potencial eléctrico de membrana con un electrodo intracelular sensible a la diferencia de potencial.

respiración) para suministrar ATP: se trataba, pues, de una ATPasa.

A parecida conclusión, ahora en hongos, llegó Clifford W. Slayman, de la Universidad de Yale, quien trabajaba con *Neurospora crassa*. Lo mismo que las plantas, también los hongos contaban con una potente ATPasa bombeadora de protones en su membrana plasmática; unas y otros, desde el punto de vista de la bioenergética de la membrana plasmática, utilizan similares sistemas de transporte activo, basados en el gradiente o diferencia de concentración de protones entre el lado externo e interno de la membrana.

Las células eucariotas presentan dos tipos distintos de circuitos de iones en su membrana plasmática: un circuito de sodio y otro de protones. El primero lo poseen las células animales, en el que una ATPasa bombeadora de iones sodio y potasio impulsa los transportes activos secundarios acoplados a la entrada de sodio. Por su lado, las células vegetales y los hongos tienen un circuito de protones, en el que la ATPasa bombeadora de protones impulsa transportes secundarios acoplados a entrada de protones.

Para explicar la distinta opción de unas células y otras, se suele aducir el carácter diferencial de la pared celular de vegetales y hongos, que es rígida de polisacáridos para evitar la ruptura osmótica, así como el ambiente relativamente ácido, pobre en sodio, donde habitan. Por contra, las células animales deben regular su volumen cuidadosamente ya que carecen de la protección de una pared rígida y el medio en que viven es relativamente alcalino y rico en sodio.

La bomba de sodio permite la regulación del volumen celular porque cataliza la salida de tres iones sodio por cada dos iones potasio que entran; resulta, pues, una expulsión neta de cationes acompañados eléctricamente por aniones permeables como el cloruro. Esta expulsión activa de osmóticos internos provoca una menor concentración de sales en el interior que en el exterior celular, en razón de lo cual queda contrarrestada la presión osmótica de las macromoléculas intracelulares (proteínas y ácidos nucleicos); si no se compensara, se produciría una entrada continua de agua y lisis celular.

En hongos y plantas el problema osmótico queda resuelto por la pared de polisacáridos y la bomba primaria no transporta Na^+ sino H^+, lo que supone ligar la bioenergética de la membrana (transportes activos) a la regulación del *p*H intracelular (acidificación). La misma enzima que permite contrarrestar la síntesis metabólica de ácidos y la difusión de ácidos externos es la que aporta la energía necesaria para el transporte activo de nutrientes.

Los experimentos con tejidos intactos no demostraban de forma concluyente que la bomba de protones fuese una ATPasa; dada la enorme complejidad de las células podría haber otros sistemas implicados en la expulsión de protones: por ejemplo, bombas acopladas a reacciones de óxido-reducción. Sólo el enfoque bioquímico, de purificación de la enzima para el estudio consiguiente de sus propiedades en el tubo de ensayo, podría aclarar la naturaleza de la bomba. Y así, en las postrimerías de los años setenta, varios laboratorios se pusieron a la tarea.

En síntesis, se trataba de purificar la membrana plasmática a partir de homogenados de células para solubilizarla luego con detergentes y separar la enzima ATPasa de las otras proteínas. Finalmente, la ATPasa purificada se incorporaba en vesículas artificiales de fosfolípidos, en donde se podía demostrar la existencia de transporte de protones acoplado a la hidrólisis de ATP. Los experimentos de Francisco Malpartida, Francisco Vara y uno de los autores (Serrano), del Instituto de Investigaciones Biomédicas del CSIC en Madrid, y los de Antonio Villalobo y André Goffeau, de la Universidad Católica de Lovaina, establecieron que la ATPasa

de membrana plasmática de hongos y plantas opera en el tubo de ensayo como una potente bomba electrogénica de protones.

La purificación de la ATPasa de membrana plasmática de hongos y plantas permitió su caracterización enzimológica, poniendo de manifiesto las similaridades con otras ATPasas de membrana.

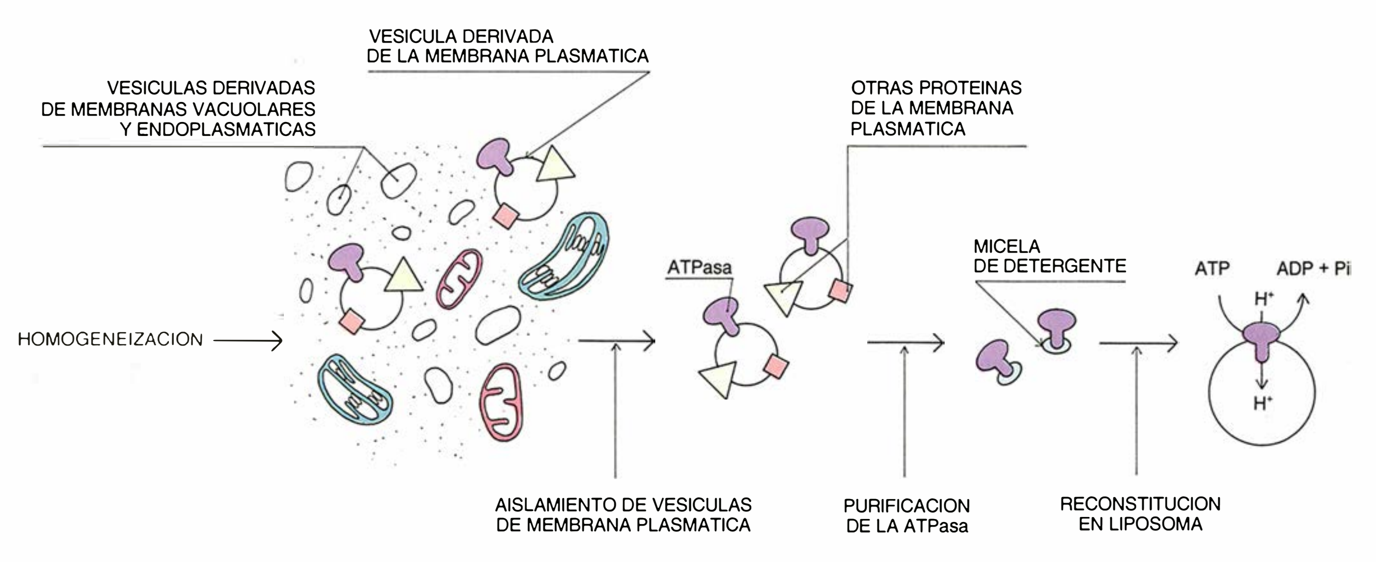
Existen dos familias de ATPasas bombeadoras de iones: las ($F_0.F_1$)-ATPasas y las (E-P)-ATPasas. Las llamadas ($F_0.F_1$)-ATPasas, o F-ATPasas, son enzimas muy complejas con más de ocho subunidades distintas, que bombean exclusivamente protones y se encuentran en las membranas de bacterias y en orgánulos eucarióticos derivados probablemente de bacterias endosimbiontes en el curso de la evolución (mitocondrias, cloroplastos y compartimiento vacuolar constituido por endosomas, lisosomas y vacuolas). Estas enzimas no forman intermediario fosforilado durante la hidrólisis del trifosfato de adenosina, ni son sensibles al vanadato, un análogo del fosfato que inhibe enzimas con intermediario fosforilado.

Por otro lado, las enzimas (E-P)-ATPasas, o P-ATPasas, poseen una única subunidad catalítica (en algunos casos tienen otra subunidad accesoria de función desconocida), forman típicamente un intermediario fosforilado (E-P, con enlace aspartil-fosfato) y son sensibles al vanadato. Esta familia, más sencilla, es también más versátil: consta de bombas para protones, sodio, potasio, calcio y cadmio. La ATPasa de membrana plasmática de hongos y plantas pertenece a esta familia y quizá representa su forma ancestral.

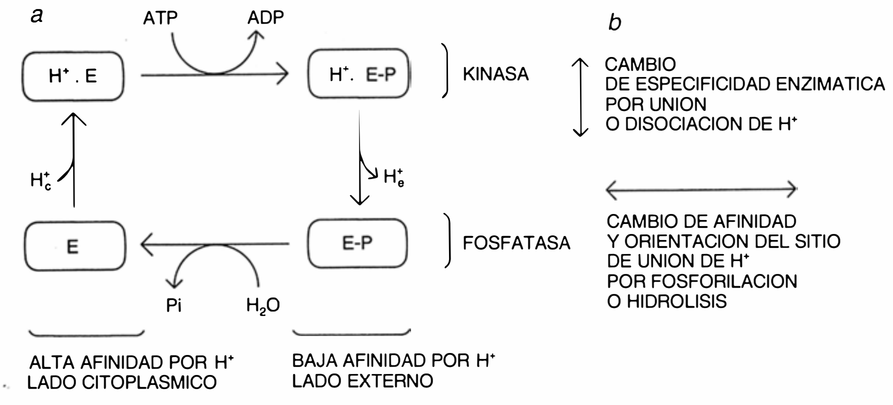
Conocemos el mecanismo de esas ATPasas con intermediario fosforilado merced a los trabajos de William P. Jencks, de la Universidad de Brandeis. El acoplamiento energético entre la hidrólisis de ATP y el transporte de iones se apoya en la diversidad de conformaciones que ofrece la enzima; así, en el caso de la H^+-ATPasa, ésta aparece en las formas (E), (H^+.E), (H^+.E-P) y (E-P), cuya significación respectiva es la de enzima defosforilada-deprotonada, defosforilada-protonada, fosforilada-protonada y fosforilada-deprotonada.

La enzima defosforilada engarza protones con gran afinidad desde el lado citoplasmático de la membrana, mientras que la enzima fosforilada los une desde el lado externo con baja afinidad, siendo a la vez la forma que suelta fuera los protones. (Alta y baja afinidad indican una mayor o menor tendencia a unir protones en un sitio determinado.) Cuando la molécula de ATP fosforila





3. TRANSPORTE DE PROTONES con ATPasa purificada en hongos y plantas, mecanismo de bombeo que quedó demostrado tras los experimentos realizados simultáneamente en 1981-82 por Francisco Malpartida, Francisco Vara y Ramón Serrano en el Instituto de Investigaciones Biomédicas del CSIC de Madrid y Antonio Villalobo y André Goffeau en la Universidad Católica de Lovaina. Tras la homogeneización mecánica de la compleja célula vegetal resulta un extracto con los diversos orgánulos subcelulares y vesículas derivadas de la fragmentación de las membranas. Las vesículas de la membrana plasmática se separan de las demás membranas (vacuolar y endoplasmática) y se aísla la ATPasa tras solubilización con detergentes. Por último, se reconstituye en liposomas o vesículas lipídicas artificiales para demostrar la existencia de un transporte de protones concomitante con la hidrólisis de la molécula de ATP.



4. MECANISMO DE ACOPLAMIENTO ENERGETICO en ATPasas bombeadoras de protones. No poseemos todavía suficientes datos para elaborar un modelo de mecanismo contrastable. El más elaborado se debe a William P. Jencks, de la Universidad de Brandeis, de acuerdo con el cual el acoplamiento energético entre la hidrólisis de la molécula de ATP y el bombeo de iones puede explicarse con un ciclo de reacción de cuatro intermediarios clave que tienen propiedades catalíticas y de transporte distintas. La unión de protones o la unión covalente de fosfato en el intermediario fosforilado modifican las propiedades de la enzima.

la enzima, se induce el bombeo de protones, porque se toman ávidamente del lado citoplasmático y se sueltan a extramuros de la membrana.

La hidrólisis de ATP necesita del transporte de protones, porque las dos etapas del ciclo catalítico, fosforilación e hidrólisis, son catalizadas exclusivamente por la enzima protonada y deprotonada, respectivamente.

Comenzando el ciclo con la conformación (E), enzima deprotonada y defosforilada, resulta que no es capaz de interaccionar con el ATP si no toma primero un protón del lado citoplasmático y adquiere la conformación (H^+.E). Esta forma tiene actividad "kinásica", es decir, transfiere el *gamma*-fosfato (fosfato terminal) de la molécula de ATP a otras moléculas, en este caso un aspartato de la propia enzima. Una vez fosforilada la enzima por el ATP, la conformación (H^+.E-P) adquirida no puede catalizar la hidrólisis del intermediario fosforilado, por lo que el protón ha de liberarse al medio externo para poder concluir el ciclo. Desconocemos las bases moleculares de estos cambios conformacionales y de estas peculiaridades del transporte y de la catálisis.

Sí conocemos con suficiente detalle los mecanismos moleculares de la catálisis de enzimas solubles, porque se han cristalizado muchas de ellas y se ha resuelto su estructura atómica, habiéndose correlacionado luego esa información con lo obtenido a través de la investigación biofísica, bioquímica y genética.

En el caso de proteínas de membrana, los estudios estructurales son mucho más difíciles, y sólo se ha resuelto la estructura de dos proteínas de membrana bacteriana: bacteriorrodopsina y centro de reacción de la fotosíntesis. No se conoce la estructura atómica de ninguna ATPasa.

El mecanismo de acoplamiento energético de las ATPasas podría ilustrar nuevos principios de la dinámica estructural de las proteínas, ya que estas enzimas realizan funciones muy distintas de las que cumplen las enzimas solubles; en esa dinámica incluimos los cambios conformacionales concertados que se dan entre reacciones químicas y fenómenos de transporte.

A este respecto, la difracción de rayos X en cristales tridimensionales de proteínas de membrana solubilizadas con detergentes y la difracción de electrones en cristales bidimensionales en membranas con alta concentración de proteína son las técnicas que deberán en un futuro proporcionar la información estructural necesaria de las distintas conformaciones de las ATPasas. Para lo cual habrá que conseguir la estabilización selectiva de cada estado conformacional con ligandos específicos, ya que, en condiciones normales, las moléculas de ATPasa sufrirán fluctuaciones entre diversas conformaciones que evitarán su cristalización. Hasta ahora, el vanadato y el calcio (este último en el caso de Ca^{2+}-ATPasas) han obtenido resultados esperanzadores en intentos de cristalización.

La única información directa disponible sobre la estructura de las ATPasas es la secuencia de aminoácidos deducida de la secuencia de nucleótidos de los genes correspondientes. La ATPasa de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* fue secuenciada, en 1985, por uno de los autores (Serrano), Morten Kiellandt-Brandt y Gerald R. Fink en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Tres años más tarde, José Manuel Pardo y el propio Serrano, en el Laboratorio Europeo de Biología Molecular de Heidelberg, y Jeffrey F. Harper y Michael R. Sussman, en la Universidad de Wisconsin en Madison, secuenciaban la ATPasa de la planta *Arabidopsis thaliana*. Posteriormente se han obtenido las secuencias de ATPasas de otros hongos y plantas.

Esas secuencias, más las de ATPasas de bacterias y animales, han permitido construir modelos teóricos y un hipotético árbol evolutivo de la familia de ATPasas con intermediario fosforilado. Aunque la ATPasa mayoritaria de las bacterias bombea protones y es del tipo ($F_0.F_1$), se han encontrado en ese taxón unas ATPasas minoritarias pertenecientes al tipo (E-P) y que bombean potasio o cadmio. Esta rama procariótica tiene solamente un 15 por ciento de homología con las ATPasas eucarióticas, y se trata de enzimas menores, de unos 600 aminoácidos, frente a los 900-1200 residuos que componen las enzimas de los organismos superiores.

Dentro de los eucariotas hay un grupo bien definido de ATPasas de protones de hongos y plantas y otro de enzimas identificadas sólo en animales y que intercambian, por bombeo, pares de cationes: sueltan fuera calcio e introducen en el citoplasma protones, sacan sodio y entran potasio, llevan fuera protones y acarrean potasio hacia dentro. Las dos últimas enzimas —ATPasa de sodio y potasio y ATPasa de protones y potasio— guardan un estrecho parecido, de hasta el 70 por ciento, lo que indica que debieron separarse relativamente tarde en la historia evolutiva. Ambas pueden transportar iones sodio o protones en intercambio con iones potasio, si bien la primera prefiere enlazarse con sodio a hacerlo con protones y la segunda se inclina por el procedimiento contrario.

Los modelos estructurales de ATPasas se basan en la localización, dentro de la secuencia de aminoácidos, de regiones hidrofóbicas compuestas por unos 17-24 residuos y capacitadas para atravesar la membrana plasmática en una configuración de *alfa*-hélice. Se han pro-

puesto de 6 a 12 de tales secuencias. Estas regiones hidrofóbicas (literalmente, que repelen el agua) interaccionarían con los lípidos de la membrana.

Queda mucho por conocer sobre el plegamiento de la larga cadena polipeptídica de las ATPasas; se acepta que los extremos aminoterminales y carboxiterminales son citoplasmáticos y que, por consiguiente, el número de regiones transmembrana debe ser par: cada dos regiones transmembrana determinarían una salida y reentrada de la cadena polipeptídica desde un lado de la membrana.

Existen dos dominios centrales citoplasmáticos que parecen contener los sitios activos. El mayor de ellos contiene el sitio de unión de ATP y sintetiza, como intermediario fosforilado, el asparil fosfato; al dominio menor se le supone implicado en la hidrólisis del intermediario o en los cambios de conformación que esa hidrólisis necesita. Con todo, los únicos datos seguros que poseemos son las pruebas de los cambios registrados en las propiedades de la ATPasa inducidos por cortes de la cadena con proteasas, de la unión covalente de reactivos análogos del ATP y de la mutagénesis dirigida de determinados aminoácidos.

En particular, los experimentos de mutagénesis realizados por Francisco Portillo y uno de los autores (Serrano) en el EMBL con la ATPasa de levadura y los del grupo de David H. McLennan, de Toronto, con la ATPasa del calcio del retículo sarcoplasmático han establecido el papel crucial que desempeñan una serie de aminoácidos persistentes en todas las ATPasas de la familia.

Conviene saber que los experimentos *in vitro* con ATPasa purificada revelan que se trata de una bomba de protones, pero no demuestran que sea ésa su función *in vivo*, y carecemos de datos para negar la posibilidad de que se trate de un artefacto de la manipulación en el tubo de ensayo o la existencia de otras bombas de protones desconocidas. Para salir de dudas, y establecer una correlación entre la enzima y su misión celular, hemos de acudir al análisis mutacional, que consiste en introducir mutaciones (cambios en la información genética) en el gen de la enzima ATPasa y estudiar las propiedades de las células que expresan dichos genes alterados.

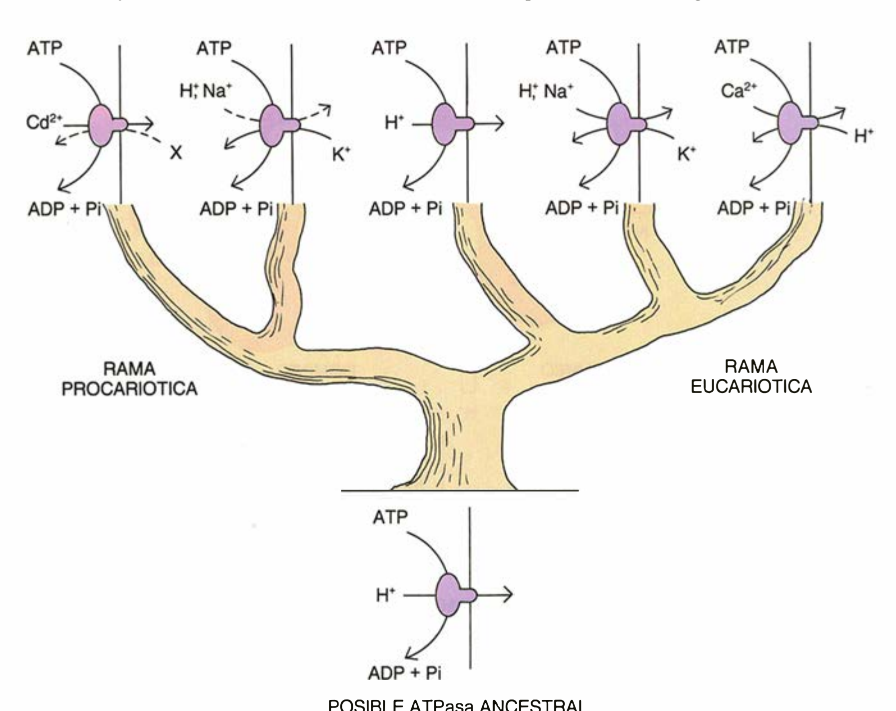
Los experimentos realizados por Portillo, Carmen García-Vallejo y Serrano en el EMBL con mutantes de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, dotados de distinto nivel de actividad, demostraron la existencia de correlación entre la actividad enzimática de la ATPasa, la acidez intracelular (*p*H) y la velocidad de transporte de aminoácidos. Consistía esa correlación en que, a mayor actividad ATPasa, mayor eran el *p*H intracelular y la velocidad de transporte de aminoácidos. Nuestros experimentos sacaron también a la luz una correlación entre actividad de la enzima ATPasa y velocidad de crecimiento, de la que se infería que la ATPasa constituye una suerte de reloj de la actividad celular.

Importa precisar que el análisis mutacional sólo puede acometerse en la levadura *Saccharomyces cerevisiae* porque exige la sustitución del gen normal que determina la proteína ATPasa por otras mutaciones construidas *in vitro*. En la levadura, esa sustitución no entraña mayor dificultad técnica y se realiza por recombinación homóloga entre el ADN cromosómico y fragmentos de ADN preparados en el tubo de ensayo; en plantas superiores, sin embargo, no se ha conseguido todavía un protocolo rutinario. A ese contratiempo hay que añadir la falta de inhibidores específicos para la ATPasa (el vanadato y otras sustancias inhibidoras intervienen también en multitud de otros sistemas celulares).

Las funciones propuestas para la ATPasa de plantas se basan en la investigación de los efectos provocados por sustancias fitorreguladoras (fusicoccina, auxina) en la fisiología (elongación celular, apertura de los estomas) y en la velocidad de salida de protones de los tejidos. Pero ese efecto correlacionador no demuestra de manera tajante que la salida de protones detectada esté mediada por la ATPasa de membrana plasmática. Aunque la enzima es capaz de bombear protones *in vitro*, no se ha podido probar, mediante análisis de mutaciones donde se altera la actividad de la ATPasa, que la enzima sea responsable de la salida de protones *in vivo*.

La auxina constituye la principal hormona del crecimiento vegetal, se sintetiza en los meristemos de tallos y coleóptilos y actúa en la parte submeristemática de células jóvenes, donde promueve la salida de protones e induce la elongación celular. En estos tejidos, se ha sugerido, la auxina activaría la enzima ATPasa, si bien lo haría con menos eficacia que la fusicoccina.

La teoría del crecimiento ácido, propuesta a finales de los años sesenta por Achim Hager, de la Uni-



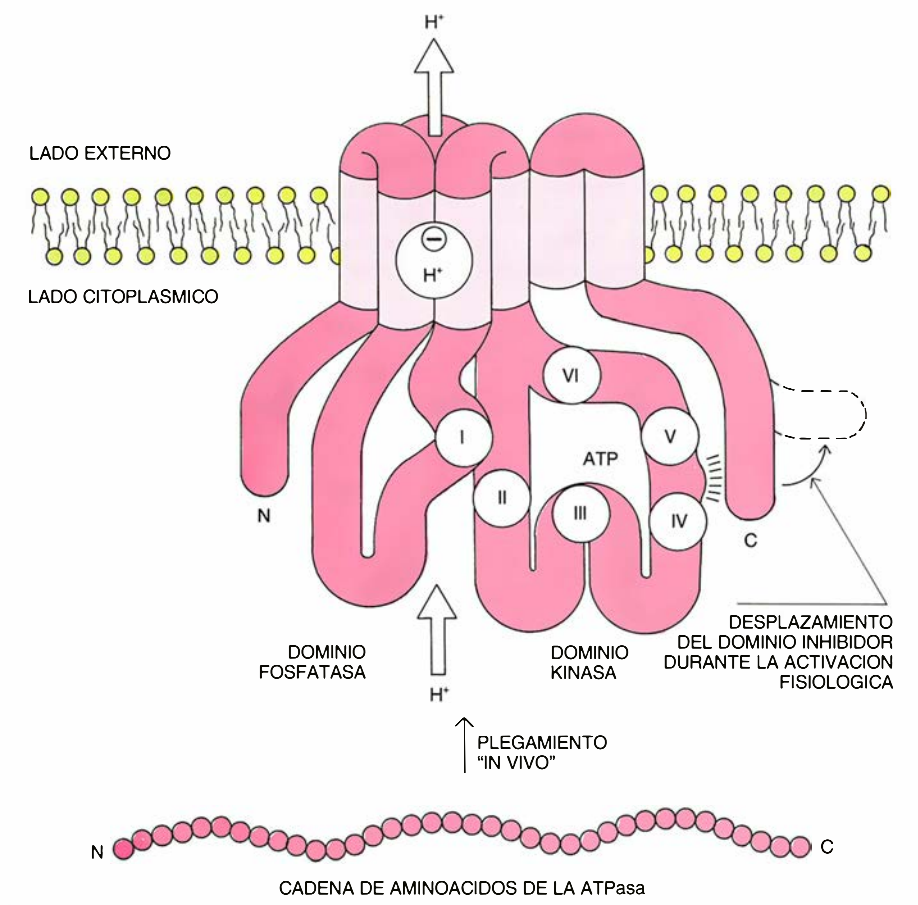
5. ARBOL GENEALOGICO de las ATPasas bombeadoras de iones con intermediario fosforilado, sugerido por los autores. La ATPasa ancestral estaría constituida por una bomba electrogénica de protones, similar a las enzimas presentes ahora en hongos y plantas. La rama procariótica contiene enzimas que catalizan la expulsión de cadmio o la toma de potasio en intercambio con protones o sodio. En células animales hay enzimas que catalizan la toma de potasio o la expulsión de calcio en intercambio con protones o sodio. Las líneas de puntos y la X indican transportes de iones por caracterizar.

versidad de Tubinga, para explicar la correlación entre salida de protones y elongación celular inducida por auxina, sostiene que la función primordial de la auxina consiste en activar la ATPasa y que los protones bombeados por ésta actúan sobre la pared de polisacáridos que confina a las células.

Al acidificarse esta región, se debilitarían los puentes de pectina y hemicelulosa que unen las microfibrillas de celulosa. Este debilitamiento podría ocurrir por medios físicos o mediante polisacaridasas de la pared que requerirían un entorno con un *p*H ácido para intervenir. Al debilitarse la pared, la presión de turgencia de las células forzaría su crecimiento.

Si bien la hipótesis se ve asistida de cierto respaldo, resulta evidente que la salida de protones no puede explicar todos los efectos de la auxina, ya que esta hormona induce la síntesis de muchas proteínas de función desconocida y activa la secreción de componentes de la membrana y de la pared para permitir el aumento de tamaño de las células. Pero aunque la activación de la ATPasa no sea el único componente de la respuesta fisiológica a la auxina, sí desempeña a buen seguro un papel crucial, porque, además de expulsar protones que reblandecen la pared, aporta la energía para el transporte activo de potasio y azúcares necesario para el crecimiento.

Georg Debus ha observado, en el laboratorio de Achim Hager, que la auxina induce la síntesis "de novo" de ATPasa, lo que justificaría la exigencia de síntesis de proteínas para provocar la salida de protones instada por la hormona del crecimiento vegetal.



6. MODELO ESTRUCTURAL DE LA ATPasa DE PROTONES. La cadena lineal compuesta por 920-950 aminoácidos (*esquema inferior*) se pliega en las membranas celulares y configura una estructura muy compleja. El modelo arriba esbozado destaca los dominios funcionales (fosfatasa, kinasa, inhibidor y transmembrana) y motivos de aminoácidos esenciales (I a VI) que han persistido a lo largo de la evolución, identificados por Francisco Portillo y Ramón Serrano, uno de los autores. El dominio inhibidor es el extremo carboxílico, que bloquea de forma regulable el centro activo. Se supone que el dominio kinasa cataliza la formación del intermediario fosforilado; al dominio fosfatasa le corresponde catalizar la hidrólisis de dicho intermediario. Se trata, sin embargo, de atribuciones de funciones más o menos hipotéticas, porque los cambios conformacionales del ciclo catalítico complican el análisis de las mutaciones.

Desde otro planteamiento, Antonio Parets-Soler y uno de los autores (Villalba) han aplicado anticuerpos desarrollados por José Manuel Pardo, en el Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg, a la búsqueda de ATPasa en distintos tejidos. En la parte aérea, la ATPasa se concentra en los estomas y en el floema de los haces conductores. Su enriquecimiento en floema explica la capacidad de este tejido de acumular activamente la sacarosa producida durante la fotosíntesis. Según parece, la sacarosa sintetizada en los cloroplastos sometidos a radiación luminosa sale al exterior celular del mesófilo de la hoja para difundirse por los espacios intercelulares hasta llegar al floema. Allí, el gradiente de protones generado por la ATPasa impulsa el transporte activo de sacarosa acoplado a protones. Luego, la sacarosa acumulada se distribuye a toda la planta en el flujo del floema.

El enriquecimiento en ATPasa de las células guarda de los estomas se justifica por la necesidad de transporte de iones durante los movimientos de los estomas. Para que éstos se abran, la enzima tiene que promover la acumulación de potasio y cloruro en altas concentraciones; el potasio cursa probablemente a través de un canal que permite el paso de cationes a favor del potencial eléctrico generado por la ATPasa, negativo en el interior citoplasmático; el cloruro se mueve mediante un sistema de cotransporte con protones.

El aumento de concentración osmótica resultante de la acumulación de potasio y cloruro determina el movimiento de apertura, consistente en la separación de las dos células guarda por su zona central de contacto, dejando un pequeño orificio. Los estomas se cierran cuando se relaja la turgencia, al perderse potasio y cloruro de las células guarda, que tienen su bomba de protones inactiva en esas circunstancias.

En las raíces de las plantas, la ATPasa abunda en la parte externa de la epidermis, incluidos los pelos radiculares, y en dos capas de células que delimitan el cilindro central, la endodermis y el periciclo. La absorción de nutrientes procede a través de dos vías distintas: ruta simplástica y ruta apoplástica. La absorción inicial desde el suelo puede ocurrir en las células de la epidermis, y entonces las sales minerales difunden de célula a célula por las

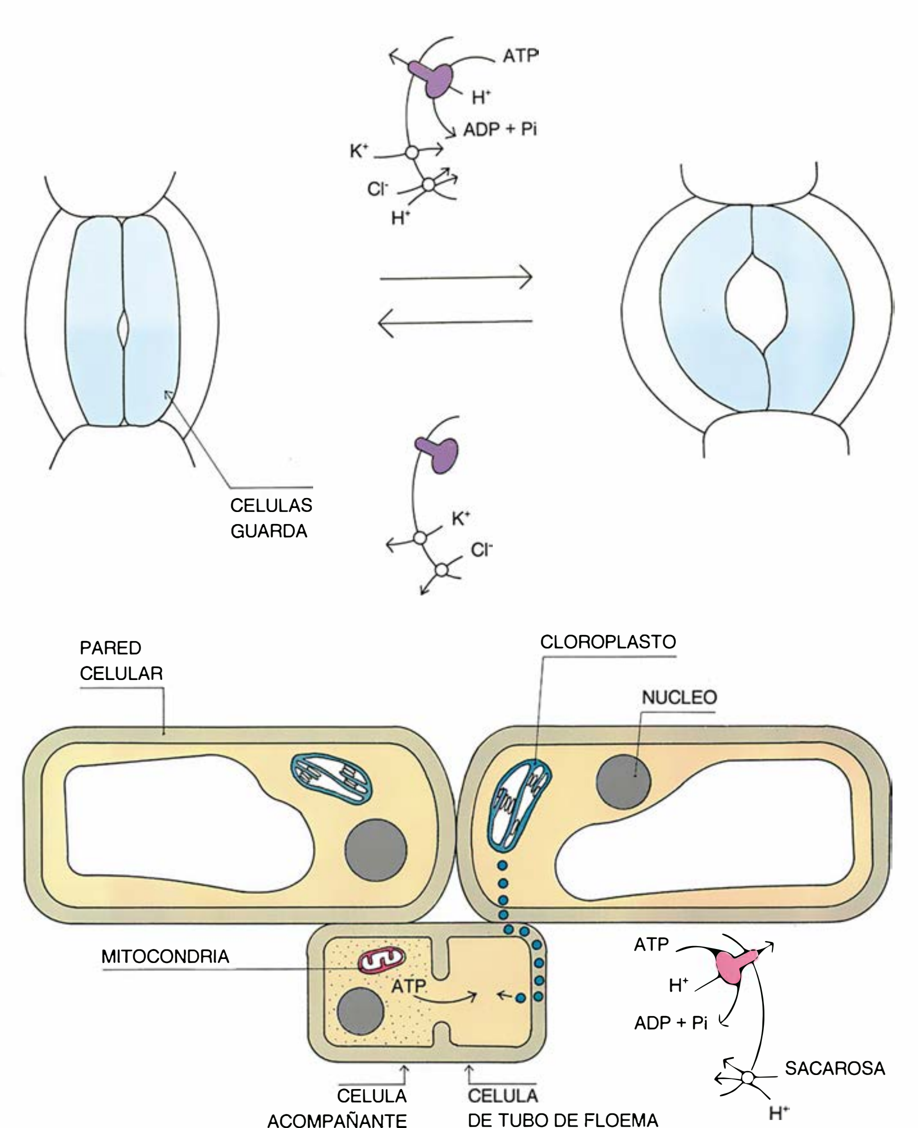
comunicaciones existentes entre ellas (plasmodesmáticas). Se trata de la ruta simplástica.

En la segunda vía, o ruta apoplástica, los minerales disueltos en el suelo penetran a través de los espacios intercelulares de las paredes y quedan frenados al llegar al cilindro central por la banda de Caspari. Se trata de una zona suberificada de la pared de la endodermis que no permite la difusión de agua y minerales y que, por tanto, aísla el contenido de los vasos de xilema en el cilindro central de la solución del suelo. Las células de la endodermis deben absorber activamente los nutrientes que llegan por esta segunda ruta.

Una vez llegados los nutrientes minerales al interior de la endodermis, se procede a la extrusión activa de los mismos a los vasos del xilema en el cilindro central. Al no concentrarse ATPasa en las células que rodean los vasos, la extrusión activa debe ocurrir en la parte interna de la endodermis y en el periciclo comunicado con la endodermis a través de plasmodesmos. Los iones expulsados se difunden por los espacios intercelulares hasta ser arrastrados por la corriente del xilema. Gracias a ese mecanismo de doble bombeo, en la superficie de la raíz y en la superficie del cilindro central, se van acumulando sales minerales en el xilema a concentraciones mucho más altas que la solución del suelo.

En resumen, la ATPasa vegetal participa en funciones esenciales de las plantas, como son la elongación celular, la apertura de los estomas y la carga de floema y xilema. La importancia de la enzima en estas funciones sólo podrá dilucidarse cuando se disponga de plantas mutantes con alteraciones en la ATPasa.

A diferencia de lo que sucede con las levaduras, la manipulación genética de las plantas no permite la generación de mutantes por recombinación homóloga, es decir, por desplazamiento del gen cromosómico por un gen manipulado en el tubo de ensayo. Pero podríamos estudiar el efecto de mutaciones de la ATPasa vegetal si los genes manipulados lograran expresarse en un sistema adecuado. En ese contexto, resulta alentador el trabajo realizado por uno de los autores (Villalba) y Michael G. Palmgren en el EMBL, quienes han conseguido expresar ATPasa de *Arabidopsis thaliana* en levadura, abriendo así la puerta a la futura identificación de residuos aminoacídicos de interés funcional mediante mutagénesis dirigida.



7. LA ATPasa se concentra en los estomas y en el floema. En el caso de los estomas (*arriba*), las células guarda deben acumular iones de potasio y cloruro durante el movimiento de apertura; esos transportes activos recaban la energía precisa de la enzima que hidroliza moléculas de trifosfato de adenosina. En el caso del floema (*abajo*), se muestra cómo la sacarosa producida en los cloroplastos de la hoja llega, por transporte pasivo, hasta el floema vía los espacios intercelulares. El floema acumula activamente sacarosa mediante cotransporte con protones; el suministro energético lo aporta la ATPasa.

Disponemos, pues, ya de las herramientas moleculares para profundizar en la estructura, mecanismo y función de la ATPasa de membrana plasmática vegetal. Contamos con genes clonados y anticuerpos altamente específicos.

Se han construido los primeros mutantes de levadura. La próxima generación de experimentos deberá combinar todas estas herramientas para responder a dos cuestiones fundamentales que siguen abiertas, a saber: ¿cómo puede la ATPasa acoplar la hidrólisis del trifosfato de adenosina al bombeo de protones? y ¿cómo puede la ATPasa controlar el crecimiento celular?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

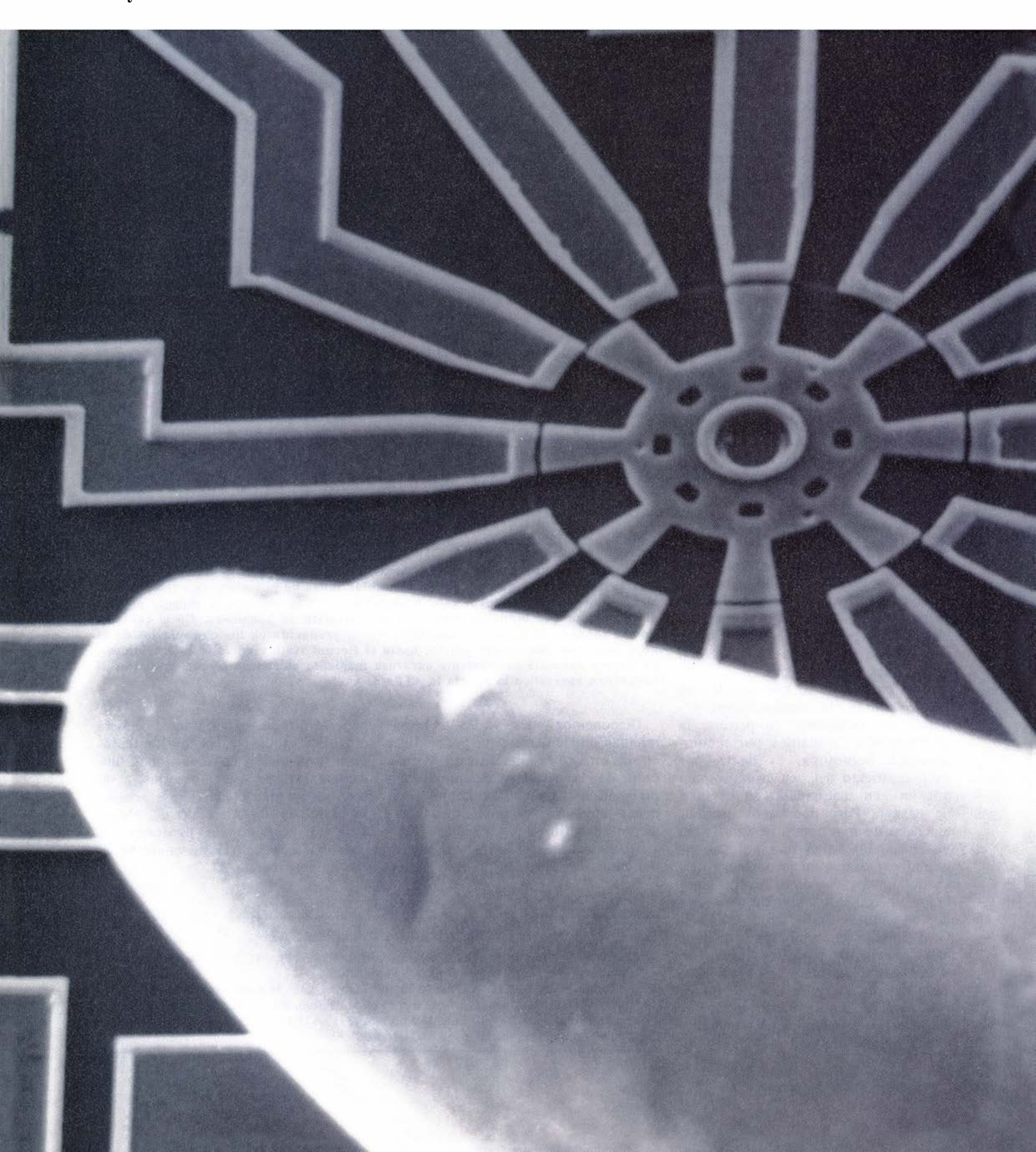
MOLECULAR BIOLOGY OF THE PLASMA MEMBRANE OF HIGHER PLANTS. M. R. Sussman y J. F. Harper en *The Plant Cell*, vol. 1, págs. 953-960, 1989.

THE PLASMA MEMBRANE H^+-ATPase OF HIGHER PLANT CELLS: BIOCHEMISTRY AND TRANSPORT FUNCTION. D. P. Briskin en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1019, págs. 95-109, 1990.

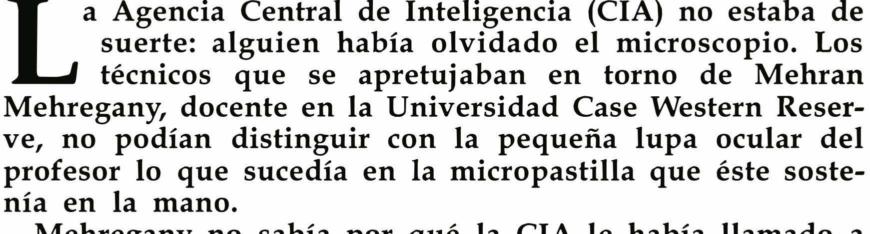
IMMUNOCYTOLOCALIZATION OF PLASMA MEMBRANE H^+-ATPase. A. Parets-Soler y R. Serrano en *Plant Physiology*, vol. 93, págs. 1654-1658, 1990.

LAS MICROMAQUINAS

Gary Stix



El silicio se está convirtiendo en la materia prima de una multitud de dispositivos capaces de trocar la superficie de las micropastillas en fábricas y laboratorios en miniatura



La Agencia Central de Inteligencia (CIA) no estaba de suerte: alguien había olvidado el microscopio. Los técnicos que se apretujaban en torno de Mehran Mehregany, docente en la Universidad Case Western Reserve, no podían distinguir con la pequeña lupa ocular del profesor lo que sucedía en la micropastilla que éste sostenía en la mano.

Mehregany no sabía por qué la CIA le había llamado a Washington. Pese a ello, quería demostrar a su audiencia que sus investigaciones no se quedaban en palabras, y que podían construirse máquinas sumamente diminutas, tales que 1000 de ellas cupiesen dentro de las letras "CIA". A falta del microscopio, el puntito oscuro en la lisa superficie del silicio tanto podría haber sido un motor giratorio como una mota de polvo.

Si los técnicos de la CIA hubieran aumentado sólo un poco la resolución, habrían percibido un elemento rotor semejante a una réplica miniaturizada de las aspas de un molino del siglo XIX. Y si Mehregany y varios centenares más de investigadores están en lo cierto, las máquinas microscópicas pueden presagiar una nueva revolución industrial, capaz de equiparar un engranaje o una bomba del tamaño de un protozoo con la válvula más famosa de todos los tiempos: el transistor.

Son muy variados los logros que promete la naciente micromecánica. Habrá píldoras "inteligentes" que inyecten dosis de medicamentos en el cuerpo de un paciente con precisión de décimas de segundo. Mediante un sistema de brazos posicionadores, de grosor menor de un micrometro, se recorrerá una zona de almacenamiento en disco de pocos centímetros cuadrados para leer y escribir cantidades de datos que podrían encerrar con gran holgura todas las ediciones de la Enciclopedia Británica hasta la fecha. Se podrá reducir al tamaño de una calculadora de bolsillo un espectrómetro de masas (incluidos detectores, bombas de vacío y todo el resto) utilizable como sensor de gases de aplicación general, que hoy pesa 18 kilogramos.

La lista ya no es un mero ensueño de futuristas y tecnófilos. De la reunión internacional bianual de especialistas, denominada *Transducers* (transductores), resultó en 1991 un libro de 1089 páginas, de muy variado contenido: dispositivo accionado por presión de burbuja, pinzas microscópicas, sonda que detecta señales nerviosas una vez

1. UNO DE LOS PRIMEROS MICROMOTORES, con rotor de 130 micrometros de diámetro, casi desaparece tras la punta de un alfiler. Mehran Mehregany lo construyó en sus años de formación en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. No ha abandonado el campo ahora que enseña en la Universidad Case Western Reserve.

alojada dentro del cerebro, sensor capaz de distinguir entre duro y blando, igual que la mano humana. Figura también en el índice una versión de los micromotores de Mehregany que algún día podría servir como músculo, o actuador, de una combinación de sensores, válvulas y electrónica en una sola pastilla ("chip") de silicio; este equipo podría ser la base de una planta microquímica o de un conjunto de instrumentos científicos a escala micrométrica.

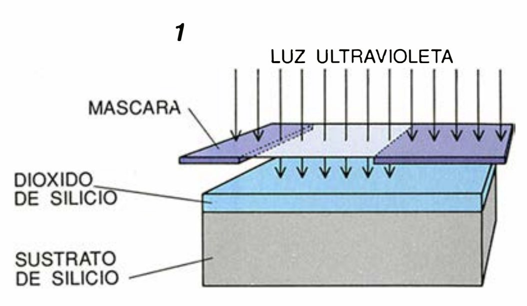
Por el momento, estos insignificantes motores resultan bastante frágiles. En seminarios como el mantenido en la CIA, Mehregany debe constantemente atender preguntas sobre la utilidad de un motor cuyo par es sustancialmente mayor que el producido por los flagelos de una *Salmonella*, pero sólo una pequeñísima fracción del que acciona un reloj de pulsera. Un motor que además tuvo en vela dos noches seguidas a los alumnos de Mehregany, Vijay Dhuler y Keren Deng, para soldar los hilos de la micromáquina a una pila (enorme en comparación) y sus circuitos de control.

El examen microscópico nos revelaría que sólo se habían conectado unos pocos hilos a uno de los 100 motores agrupados en la pastilla, quedando al lado de la máquina en funcionamiento otros 99 inactivos por falta de conexión. Mehregany calcula que podrían fabricarse hasta un millón de motores en una oblea de silicio de la cual se cortarían pastillas individuales. Un grupo de cientos de miles de motores podría bombear cerca de un litro de fluido por minuto, cantidad que en potencia ya es útil; sin embargo, Mehregany todavía medita lo que puede hacerse con ese inmenso parque de microbombas.

Para su realización práctica, los micromotores necesitarán todo el auxilio de la microelectrónica. La fotolitografía combinada con la grabación mediante plasma químico ha sustituido a la estampación y la fundición como tecnología de fabricación masiva predominante a finales del siglo XX. Con los mismos métodos que se colocan miles de cables y transistores en espacios submilimétricos se realizan también estructuras giratorias y vibratorias de esas dimensiones.

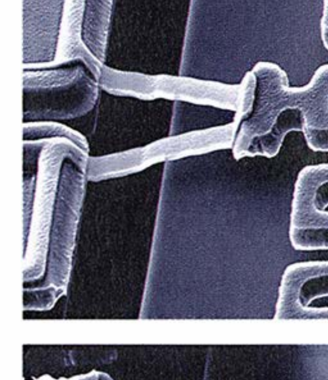
Algunos creen que el silicio, principal componente de la arena, es poco adecuado como material estructural de motores minúsculos o de pequeñas vigas en voladizo cuyas vibraciones miden la aceleración. En 1981 Kurt E. Petersen escribió un artículo de larga resonancia: "El silicio como material mecánico". La dureza del silicio, observó, "se acerca a la del cuarzo, es algo inferior a la del cromo y casi el doble de la del níquel, hierro y la mayoría de los vidrios comunes". Además, su resistencia a la tracción supera la del acero; su fragilidad, no obstante, le impide ser un material ideal en todos los aspectos.

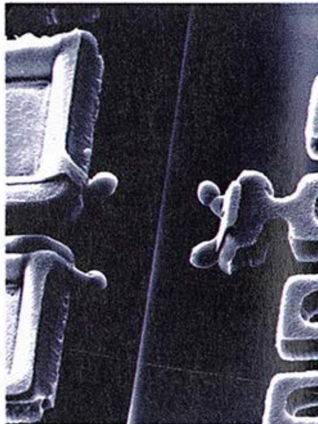
Las micromáquinas que construyen Mehregany y otros son el fruto de más de 20 años de investigación, desarrollo y comercialización de senso-

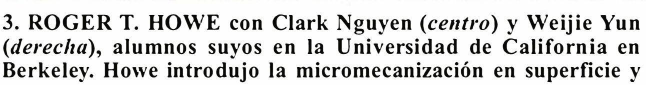


2. FABRICACION de una viga sobre pastilla de silicio, proyecto de doctorado de Roger T. Howe. La luz ultravioleta

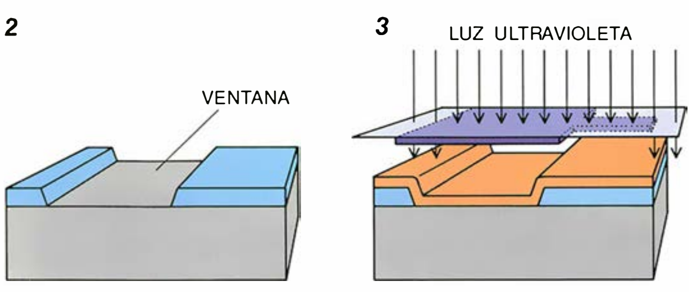


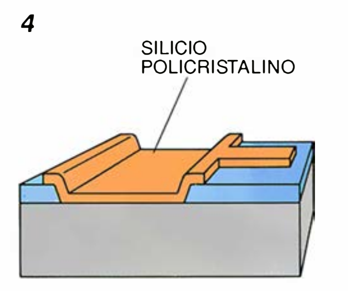


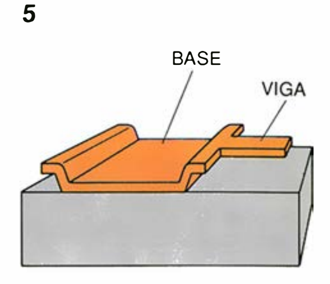


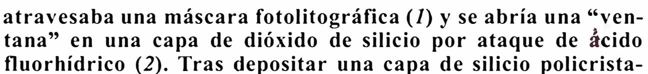


3. ROGER T. HOWE con Clark Nguyen (*centro*) y Weijie Yun (*derecha*), alumnos suyos en la Universidad de California en Berkeley. Howe introdujo la micromecanización en superficie y ha desarrollado métodos para el montaje de esas estructuras: una débil corriente atraviesa un fusible de dos décimas de micrometro de espesor (*centro, arriba*), que libera una viga doblada









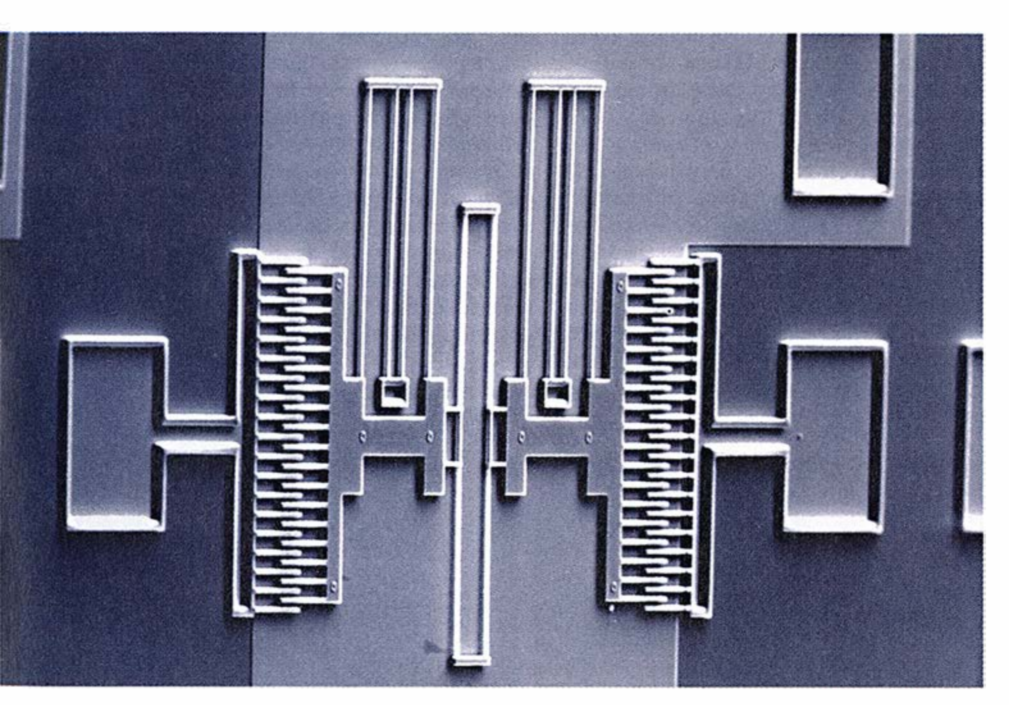
atravesaba una máscara fotolitográfica (*1*) y se abría una "ventana" en una capa de dióxido de silicio por ataque de ácido fluorhídrico (*2*). Tras depositar una capa de silicio policristalino se modelaban la base y la viga (*3*). Con plasma químico se grababan las áreas de silicio policristalino expuestas por la litografía (*4*). Se eliminaba con ácido el SiO_2 sobrante (*5*).

res, sobre todo de silicio. En los procesos de fabricación más antiguos, se ataca con sustancias químicas alcalinas las zonas de silicio monocristalino que han quedado previamente expuestas a través de una máscara fotolitográfica. El grabado produce cavidades cóncavas, piramidales o de otras formas, según la cara del cristal sometida a los productos químicos. Con estas cavidades esculpidas pueden construirse vigas en voladizo, diafragmas u otros elementos estructurales necesarios para fabricar sensores de presión o aceleración.

Esta técnica, iniciada en los años sesenta, se ha dado en llamar micromecanización en volumen debido a que las sustancias químicas socavan en profundidad el silicio y producen estructuras que utilizan la masa entera de la pastilla. Por la misma época en que Petersen escribía su artículo, Roger T. Howe, alumno de la Universidad de California en Berkeley, tropezaba con algunas de las limitaciones de la micromecanización en volumen, y esto le indujo a desarrollar un método para obtener sensores y actuadores, más afín al proceso tradicional de fabricación de circuitos integrados.

Dirigido por el profesor Richard S. Muller en su proyecto de graduación, Howe se proponía construir un sensor de gases —una diminuta viga cuya frecuencia de vibración se desplazara al condensarse un vapor gaseoso en su superficie. Howe quería fabricarlo utilizando la micromecanización en volumen, pero se desanimó tras discutir sus planes con Petersen y otros investigadores. Situar condensadores bajo la minúscula viga para hacerla vibrar y detectar la resonancia resultaba dificilísimo.

Reflexionando sobre el problema, Howe recordó que el silicio policristalino (en el que las caras del cristal se orientan al azar) tiende a depositarse sobre sustratos de silicio a partir de compuestos gaseosos para formar así un elemento del transistor, la puerta, que activa y desactiva el dispositivo cuando se aplica una tensión. Recurrió, pues, al llamado "polisilicio" para construir su viga minúscula.



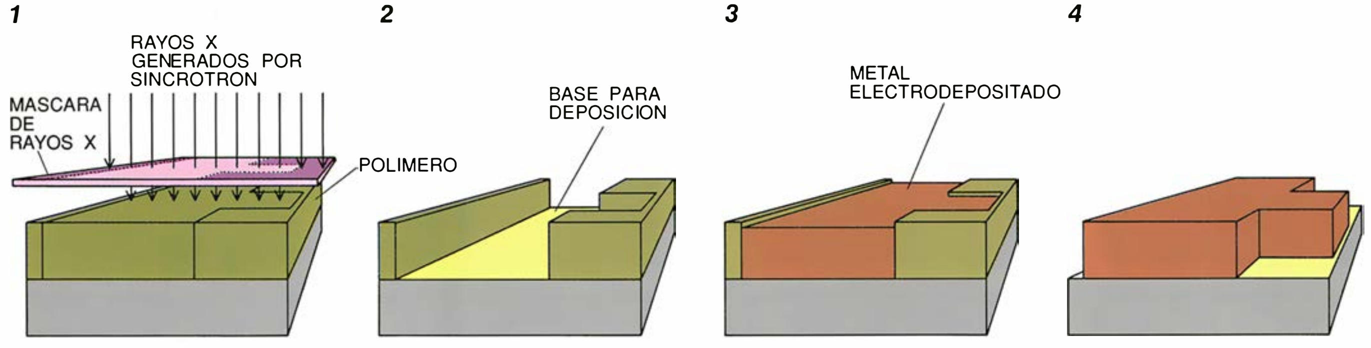
(*centro, abajo*). Este proceso ayudó a fabricar un filtro acústico mecánico (*derecha*) de pocos cientos de micrometros de ancho, el cual acopla las vibraciones de sendos grupos de vigas dobladas a través de un resorte (*estructura rectangular en el centro*).

Trampolín sobre la pastilla de silicio

Depositó sobre un sustrato de silicio el silicio policristalino procedente de vapores gaseosos, lo configuró mediante fotolitografía y después lo grabó. Finalmente, atacando con ácido fluorhídrico, eliminó o "sacrificó" la capa de dióxido de silicio subyacente para dejar la viga suspendida en el aire. Howe prosiguió su trabajo hasta fabricar el sensor de gases, completando así una verdadera tesis doctoral.

Lo más importante del pequeño trampolín de Howe no fue el propio sensor de gases, sino haber basado su fabricación en las tecnologías de deposición en fase vapor y de grabado que se aplican a la producción del tipo más común de transistor, el semiconductor metal-óxido (MOS). No se emplearon en absoluto las sustancias químicas alcalinas necesarias para la micromecanización en volumen, que son ajenas al procesado convencional de las pastillas de silicio.

Esta técnica de micromecanización en superficie consiste en el depósito de una capa de silicio de pocos micrometros de espesor, a partir de la cual pueden fabricarse vigas y otras estructuras. La finura de las estructuras constituye un reto para quien las diseña, ya que debe obtener un trabajo útil de máquinas cuya forma es esencialmente bidimensional. Desde que Howe terminara su sensor de gases, otros han empleado la misma técnica para construir válvulas, motores y un extraño arsenal de dispositivos más parecidos a un texto de medicina que a un curso de ingeniería mecánica. Las imágenes en blanco y negro del microscopio electró-



4. MOLDEADO POR INYECCION de piezas microscópicas. Puede realizarse mediante un proceso original del Centro de Investigación Nuclear de Karlruhe. Su nombre LIGA responde a las iniciales de *Litographie* (litografía), *Galvanoformung* (electrodeposición) y *Abformung* (moldeado). Los rayos X de un sincrotrón atraviesan la zona transparente de una máscara litográfica (*1*). La parte expuesta de la capa de polímero, de unos cientos de micrometros de espesor, se elimina mediante

nico de barrido muestran cadenas de paralelogramos que se expanden y contraen como gusanos, filas de elementos ciliares que surgen en rizos del plano, y artilugios que se estiran y encogen con diseño inspirado en las fibras musculares.

Howe, hoy atareado profesor en Berkeley, ha desarrollado también otros métodos que permiten trabajar la superficie de la pastilla de silicio cual si fuera un trozo de lámina metálica. En un congreso reciente, él y sus alumnos presentaron paneles sobre técnicas de montaje automático de estructuras micromecánicas. En virtud de ellas, saltan al unísono cientos de diminutos fusibles de silicio, de espesor dos décimas de micrometro, al ser sometidos a una corriente eléctrica, con lo que liberan una viga suspendida; también se funden las juntas de soldadura de aluminio repartidas por toda la pastilla cuando se les aplica una corriente, sujetando así la viga.

Estos procesos podrían finalmente servir para ensamblar las estructuras mecánicas de Howe, entre ellas una versión miniaturizada de un dispositivo eléctrico de varios decenios de antigüedad. En un principio, las señales acústicas se filtraban con placas resonantes de aleaciones de níquel y hierro, a escala de centímetros, que más tarde fueron sustituidas por elementos condensadores de circuitos integrados, más económicos y pequeños aunque no sintonizaban las señales con la misma eficacia. Howe y su grupo presentan ahora filtros micromecánicos capaces de producir más señal y menos ruido, sintonizando un margen de frecuencias más amplio que los elementos integrados a los que reemplazan. Pueden alojarse cientos de ellos en el centímetro cuadrado que ocupa una micropastilla.

El filtro trabaja utilizando la tensión de una señal de audio para imprimir un vaivén a un juego de barras suspendidas entre las placas estacionarias de un electrodo, estructura que suele compararse con dos peines entrelazados. Las oscilaciones, transmitidas por un resorte microscópico, alteran las vibraciones de un juego adyacente de barras y electrodos en forma de peine. Del acoplamiento de resonancias entre los dos "peines actuadores" resulta una señal filtrada, que luego vuelve a ser convertida en señal eléctrica.

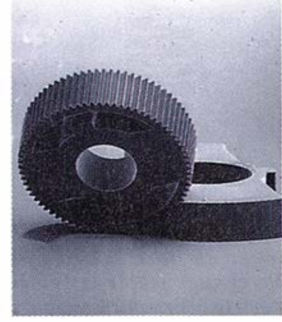
La creatividad de Howe ayudó también a concebir un producto de la investigación micromecánica mejor conocido, aunque quizá menos funcional: uno de los primeros micromotores giratorios. A Howe se le ocurrió la idea del micromotor en su etapa de docencia en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), a mediados de los ochenta. Los esfuerzos por crear un micromotor pronto desembocaron en reñida competición entre el MIT y Berkeley. Finalmente Berkeley ganó la carrera, anunciando en el verano de 1988 que había conseguido propulsar un micromotor en el que un conjunto de condensadores generaban un campo eléctrico y éste hacía moverse un rotor.

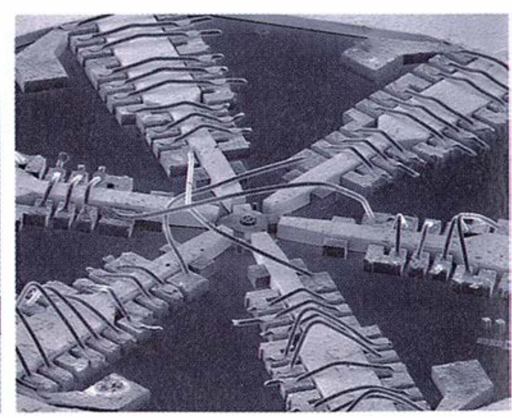
El micromotor se convirtió inmediatamente en un símbolo de esta joven disciplina. Las microimágenes de vigas, voladizos y peines actuadores se parecen a las cosas que uno espera ver en un microscopio.

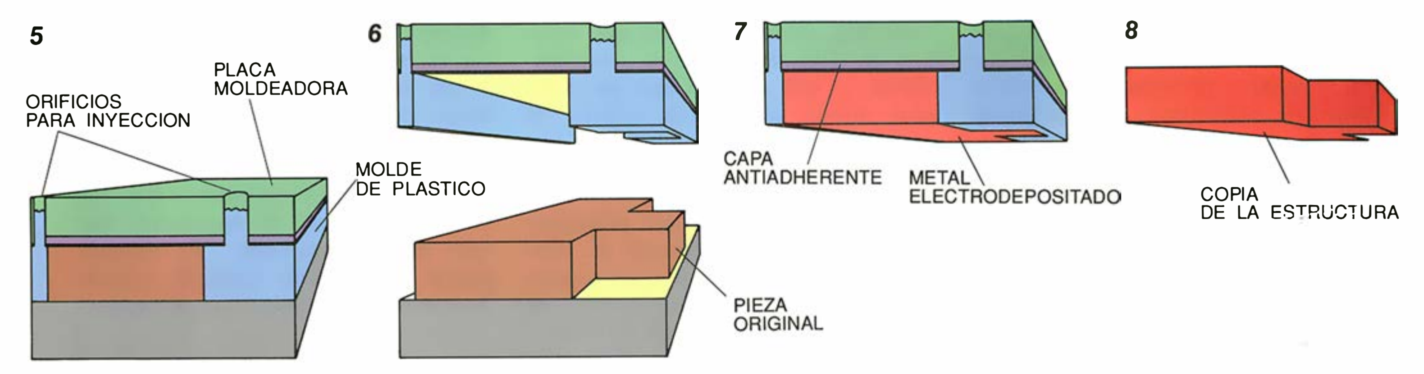
Los primeros micromotores eran realmente frágiles: conseguir que giraran fue al principio todo un problema. Los rotores, tras ser separados del sustrato de silicio subyacente mediante ácido fluorhídrico, a menudo quedaban inmovilizados por el roce con la superficie del silicio. Asimismo mostraban una irritante tendencia a funcionar durante algunos miles de revoluciones y después pararse de repente. Además, los esfuerzos residuales entre las capas depositadas en la micromecanización de la superficie provocaban que los rotores se rizaran hacia arriba, por el efecto llamado de "patata frita".

Estos motores de la primera hornada pueden poner en apuros a quien monte una empresa de micromecánica, ya que deberá explicar al cliente o al inversor en qué se diferencia su microválvula o sensor del micromotor, que algunos consideran un juguete. Pero vistas bien las cosas los micromotores constituyen un éxito, pues conseguir que un rotor gire alrededor de un eje es probablemente el trabajo de investigación más difícil para un aprendiz de micromecánico. Un experto de los Laboratorios Bell, que al final acabó presentando su propio micromotor, afirmó en cierta ocasión que las tensiones necesarias para generar un campo eléc-









un producto químico revelador (*2*). Se electrodeposita níquel u otro metal sobre una base (*3*). Después se elimina el polímero restante (*4*), se coloca una placa moldeadora sobre el metal y se inyecta plástico a través de los agujeros de esa placa (*5*). La pieza metálica original se retira y se emplea para otros moldes (*6*). Se electrodeposita metal sobre el molde de fundición plástico (*7*), y se elimina el plástico y una capa antiadherente de la pared del molde, liberando la estructura metálica (*8*).

trico capaz de girar los rotores serían tales que imposibilitarían el trabajo de los dispositivos. Se creía también que los micromotores se convertirían en aspiradores, que acabarían enterrados bajo un aluvión de partículas de polvo atraídas por el campo eléctrico.

Ninguna de estas predicciones se confirmó, ni tampoco los malos augurios que parecían consecuencia de los problemas iniciales sobre bloqueos por el rozamiento. Ciertamente, no se conoce bien la teoría del rozamiento a escala microscópica. Sin embargo, Mehregany, que siendo estudiante trabajó en el equipo original del MIT, ha proseguido su investigación sobre micromotores en Case Western.

Sigue un método empírico, que consiste en alternar distintos diseños de ejes y cojinetes del rotor hasta que el rozamiento se reduzca a un 10 % del par motor total, valor todavía entre diez y cien veces mayor que el correspondiente, por ejemplo, al motor de una lavadora. El motor de Mehregany ha operado incluso a 15.000 revoluciones por minuto. A velocidades menores, funcionó días y días sin descanso. El uso de materiales y electrónica de control mejores debería duplicar la velocidad máxima y reducir la componente de rozamiento.

Obtener de un micromotor un par mayor de unas billonésimas de newton-metro es una cuestión fácil, si el dispositivo es algo menos liso que un espejo. El valor del par motor aumenta con la altura de la estructura; un motor micromecanizado en superficie tiene sólo dos o tres micrometros de espesor. Para alcanzar la profundidad necesaria, algunos investigadores recurren a materiales estructurales distintos del silicio.

A principios de los ochenta, Wolfgang Ehrfeld dirigía un equipo, en el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe, que ideó un método para fabricar microestructuras más altas que anchas: por ejemplo, un dispositivo de níquel que mide cinco micrometros de anchura y 300 de altura. Ehrfeld tomó como base un proceso desarrollado en Karlsruhe para fabricar inyectores cuya forma curvada actúa a modo de minicentrifugadora, permitiendo la separación de los isótopos del uranio. Esta técnica se denomina LIGA, siglas en alemán de *Litographie, Galvanoformung, Abformung*.

Al igual que la micromecanización en superficie y en volumen, la técnica LIGA está basada en el modelado litográfico. Pero en vez de emplear rayos de luz ultravioleta a través

5. HENRY GUCKEL, al que vemos aquí con su alumno Todd Christenson, ha empleado la técnica LIGA para fabricar un micromotor magnético giratorio en la Universidad de Wisconsin en Madison. Christenson utiliza un sincrotrón en horas de madrugada para fabricar ruedas dentadas (*centro*) y parodias ocasionales, como la llave fija de 200 micrometros de longitud (*izquierda*).

de la máscara fotolitográfica, el proceso usa rayos X de alta energía, que penetran a profundidad de varios cientos de micrometros en una gruesa capa de polímero. Las áreas expuestas se tratan luego con un producto químico revelador, dejando una plantilla que puede rellenarse con níquel u otro material mediante electrodeposición (*Galvanoformung*). La pieza así obtenida puede ser un elemento estructural o bien el patrón para un proceso de moldeado (*Abformung*).

Como sucede en la micromecanización en superficie, las estructuras LIGA pueden procesarse para eliminar la capa subyacente, obteniendo estructuras suspendidas o móviles sobre un sustrato. El proceso completo puede realizarse en la superficie de una pastilla de silicio, lo que confiere a la técnica LIGA cierto grado de compatibilidad con la microelectrónica. Hasta el momento, Karlsruhe ha producido dispositivos ópticos de plástico, así como sensores de aceleración, turbinas y motores de metal: versiones tridimensionales de algunas de las estructuras fabricadas por micromecanización en superficie.

La gran LIGA

La técnica LIGA marca la vanguardia de un esfuerzo, con soporte gubernamental, que intenta colocar a Alemania a la cabeza de la micromecánica, compensando así el fracaso del país en conquistar un liderazgo mundial en la electrónica. Al haberse desacelerado la investigación sobre nuevas tecnologías de reactores nucleares, Karlsruhe planea dedicar más de 200 científicos del Centro a trabajar en la técnica LIGA y en micromecánica. Mientras tanto Ehrfeld, el pionero de LIGA, dejó Karlsruhe hace unos cuatro años tras no poder conseguir un ascenso, y ahora prepara un programa equivalente en un instituto financiado por el gobierno en Maguncia.

El Centro de Karlsruhe también ha ayudado a transferir esta tecnología a la industria privada, concediendo licencias sobre sus patentes a MicroParts, una empresa propiedad conjunta de industrias siderúrgicas, químicas y eléctricas, que es el único suministrador comercial de componentes LIGA en todo el mercado.

La micromecánica en Alemania no se acaba con LIGA. El gobierno invierte además 70 millones de dólares al año en lo que llama microsistemas, un conglomerado de tecnologías que cubre la micromecánica y la electrónica. Este programa lo administra el Centro de Tecnología VDI/VDE, instituto estatal que coordina la financiación de la micromecánica, y que actúa como un paraguas donde se cobijan cientos de pequeñas y medianas empresas e institutos de investigación de todo el país. Karlsruhe y VDI/VDE han abanderado también una propuesta para establecer un programa de 1000 millones de dólares, enfocado a estas tecnologías de la miniaturización, en el seno de la Comunidad Europea.

Los investigadores de Karlsruhe tienen una espina clavada: Henry Guckel, profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de Wisconsin en Madison, pretende haber realizado trabajos todavía no igualados por el grupo de Karlsruhe. En los primeros ochenta, Guckel empezó a estudiar el silicio policristalino como material constitutivo de estructuras móviles o suspendidas para sensores. Leía "entre líneas", como él dice, las publicaciones procedentes de Alemania sobre la técnica LIGA, pensando en las posibilidades que encerraba el sincrotrón existente en su propio campus, el cual se utilizaba en el estudio de la litografía por rayos X para microcircuitos.

Natural de Hamburgo, Guckel llegó en 1950 a los Estados Unidos, con 18 años de edad. El grupo de Guckel fabricó los primeros juegos de ruedas dentadas de níquel, de 50 a 200 micrometros de diámetro y 200 a 300 de altura, que se acoplan para formar trenes de engranajes. Para desmentir a quienes creen que los sistemas mecánicos microscópicos requieren diseños especialmente adaptados a esa escala, Guckel acaba de construir un micromotor que no está alimentado por electricidad estática, sino magnéticamente, como los motores eléctricos de las neveras domésticas.

Otros investigadores evitan el uso de fuerzas electromagnéticas para mover engranajes pequeños por creer que, para dimensiones del orden de los 100 micrometros, las leyes de escala hacen que las fuerzas electrostáticas normalmente más débiles sean equivalentes o más intensas que las fuerzas magnéticas. Guckel opina que tal vez sea erróneo basar los razonamientos en la escala. Como él aduce, un motor electrostático que ha de funcionar a las bajas tensiones de alimentación de un circuito integrado requiere tolerancias muy estrictas, es decir, separaciones inferiores a un micrometro entre el rotor del motor electrostático y los electrodos que generan el campo eléctrico; en cambio, un motor magnético que está excitado por corriente, y no por tensión, puede trabajar con separaciones mayores a niveles de potencia razonables.

Los motores magnéticos, sin embargo, no pueden utilizarse con ciertos tipos de circuitos semiconductores. Y, por el momento, hay que montar a mano, laboriosamente, los minúsculos trenes de engranajes que esos motores accionan. "Es ridículo pensar en construir cajas de cambio de cuatro velocidades con tecnología

El desarrollo de la micromecánica se ha apoyado en los procesos de fabricación miniaturizada, tales como la litografía, que habitualmente se utilizan en tecnología microelectrónica. La investigación en micromecánica queda, pues, supeditada a la disponibilidad de infraestructura microelectrónica, y dentro de tales condicionantes puede afirmarse que la actividad española en micromecánica ha conocido un rápido avance en los últimos años.

El Centro Nacional de Microelectrónica (CNM), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, mantiene un grupo de investigación en micromecánica desde 1989. La actividad del grupo, encuadrado en el Departamento de Silicio del Centro, ubicado en Bellaterra (Barcelona), se ocupa de los procesos de micromecanización del silicio y de su aplicación a la fabricación de dispositivos sensores y actuadores. Para desarrollar esta labor, el CNM dispone de infraestructura tecnológica: una sala blanca equipada con una línea completa de fabricación de circuitos integrados de silicio, a la que el grupo de micromecánica ha añadido los equipos y procesos específicos para esta tecnología.

Inicialmente se desarrollaron los procesos tecnológicos de micromecanización en volumen, consistentes en el grabado anisotrópico del silicio mediante soluciones líquidas alcalinas. Gracias a la aplicación de esta técnica se han obtenido membranas de silicio de unos pocos micrometros de espesor y menos de un milímetro de lado, que se han empleado para fabricar sensores de presión. Con posterioridad se ha desarrollado también la técnica complementaria de grabado del silicio por plasma químico seco. La combinación de ambas técnicas ha permitido construir bloques de silicio de 3 × 3 × 0,3 mm suspendidos de pequeñas vigas de 100 × 15 micrometros de sección. Con estas estructuras se han fabricado dispositivos sensores de aceleración, en los que los bloques de silicio actúan como masas inerciales. Se ha trabajado también en la tecnología de micromecanización en

de microsistemas", sostiene Wolfgang Menz, que dirige los trabajos sobre LIGA en Karlsruhe y opina que es un error copiar máquinas grandes. "Una mosca no tiene la misma estructura que un elefante. Las leyes físicas impiden achicar un elefante a un milímetro, y tampoco se podría aumentar una mosca hasta cinco metros de longitud".

Lo que no obsta para que los motores magnéticos metálicos exploten al máximo la ligerísima masa de las micromáquinas. Según Guckel, éstas podrían operar a velocidades de rotación más altas que los motores electrostáticos, llegando al millón de revoluciones por minuto. Todd Christenson, alumno de Guckel, trabaja en un medidor de par con engranajes múltiples que podría detectar variaciones de sólo algunas revoluciones en velocidades de rotación de cientos de miles de vueltas por minuto. Este dispositivo permitiría estudiar los efectos a pequeña escala del rozamiento y otras fuerzas.

El principal objetivo de Guckel es conseguir un producto que alguien desee comprar. El Ejército de los Estados Unidos ha manifestado interés por una pequeña turbina que se alimentaría al ser agitada en el aire, sacando energía suficiente para abastecer una micropastilla. Todavía más acuciante es el mercado de controladores de discos de ordenador. En el Centro de Investigación Almadén de IBM en San José, un equipo está trabajando en diminutos actuadores para situar los cabezales de controlador de disco y en micromotores para hacer girar los discos.

La técnica LIGA tiene problemas de financiación, lo mismo que otras investigaciones micromecánicas en Estados Unidos, donde los sincrotrones de alta energía para litografía de rayos X pueden contarse con los dedos de una mano. Los estudiantes de Wisconsin procesan sus láminas de polímero desde medianoche hasta las 8 de la mañana, y a esa hora deben ceder el haz a otro grupo de investigación.

Guckel señala que podrían producirse miles de piezas a bajo coste por técnica LIGA mediante un proceso de moldeado por inyección desarrollado en Karlsruhe. Aun así, los enormes costes de esta técnica habrán de ser compartidos entre varios socios. En otro orden, Wisconsin podría dejar de ser la única universidad de Estados Unidos que trabaja en LIGA. La Universidad Técnica de Louisiana acaba de establecer un programa de investigación en micromecánica que incluye esta técnica.

Puede sostenerse que los Estados Unidos mantienen el liderazgo en la investigación académica sobre micromecánica. Las universidades con programas en esta tecnología han sembrado de titulados superiores Ford, IBM y Hewlett-Packard.

Japón entra en escena

Mientras tanto, las empresas japonesas han empezado a erigirse en fuentes de innovación. En un importante congreso de 1991, presentaron 21 contribuciones técnicas frente a 12 solamente de las empresas americanas. Los sensores y actuadores miniaturizados aportan beneficios indudables a la industria japonesa, dada su posición de liderazgo en electrónica de consumo, robótica, microelectrónica y el automóvil.

El gobierno japonés ha dado prio-

La micromecánica en España

superficie, con silicio policristalino como material estructural, y en ella se han fabricado diversos tipos de estructuras, desde puentes y vigas en voladizo de uno o dos micrometros de espesor, veinte de anchura y algunos cientos de longitud, hasta estructuras resonantes a escala de cientos de micrometros que se desplazan paralelamente a la superficie del silicio por la acción electrostática de electrodos en forma de peine. Esta tecnología sirve de base para la fabricación de estructuras más complejas de silicio policristalino, como son los micromotores electrostáticos, actualmente en fase de desarrollo.

La actividad del grupo en micromecánica se financia a través de los contratos establecidos con empresas privadas u organismos de investigación públicos, además de los proyectos que realiza por encargo de unas u otras entidades. En este sentido, no existe ningún programa español o comunitario de apoyo a la micromecánica, aunque sí los hay en el campo de los sensores microelectrónicos, que son una de las aplicaciones más directas de la misma. El dominio de los sensores microelectrónicos cuenta con el respaldo del programa GAME (Grupo Activador de la Microelectrónica en España), promovido conjuntamente por la Comunidad Europea y la Administración española. En el ámbito de la Comunidad Europea, los sensores micromecánicos integrados están cubiertos por el programa ESPRIT. Asimismo, la Dirección General XIII de la Comisión de las Comunidades Europeas prevé incluir la tecnología de microsistemas como uno de los pilares del Cuarto Programa Marco de Investigación de la Comunidad, que deberá iniciarse a partir de 1995.

Como ejemplo de la actividad española en el momento presente, el grupo del CNM participa en dos proyectos, juntamente con empresas e institutos de investigación europeos. En estos proyectos, encuadrados en los programas BRITE/EURAM y ESPRIT de la Comisión de las Comunidades Europeas, se desarrollan, respectivamente, tecnologías de micromecanización del silicio y un acelerómetro multiaxial inteligente integrado. En este último proyecto participan también, por el lado español, la empresa automovilística Seat y la Universidad de Barcelona. El grupo interviene además en dos proyectos financiados por el Plan Nacional de I+D, relativos a tecnologías de micromecanización y microacelerómetros de silicio para aplicaciones en robótica. Dentro de los proyectos puramente industriales, el grupo ha suscrito con la empresa Leventon S.A. un contrato, financiado por el programa GAME, para el desarrollo de sensores de presión miniaturizados a base de membranas de silicio micromecanizadas, los cuales tendrán aplicación en catéteres cardiovasculares, además de un contrato con la empresa MBT Tecnología Ambiental en el que se desarrollan sensores químicos de iones constituidos por dispositivos de silicio micromecanizados, proyecto éste financiado por el CDTI.

El laboratorio de caracterización de materiales para la microelectrónica de la facultad de física de la Universidad de Barcelona trabaja también en el campo de la micromecánica, centrándose en cuestiones tales como el diseño y la simulación de dispositivos micromecánicos, y la caracterización de dichos dispositivos y los materiales que los constituyen. Esta actividad se realiza en estrecha colaboración con el grupo de micromecánica del CNM, e incluye la participación en muchos de los proyectos mencionados en el párrafo anterior.

Por otra parte, la presente actividad española en micromecánica ya no se circunscribe a los centros públicos de investigación. El Grupo Fagor, con sede en Mondragón (Guipúzcoa), en colaboración con el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT), está iniciando el desarrollo de la tecnología de micromecanización en volumen del silicio, con vistas a la posterior fabricación de dispositivos sensores para aplicaciones de control industrial. (Joan Bausells y Jaume Esteve, del Centro Nacional de Microelectrónica en Barcelona.)

6. KAIGHAM J. GABRIEL, director del programa de micromecánica en la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (DARPA), sostiene una pastilla de silicio de Texas Instruments que contiene dos millones de espejos metálicos móviles para modular el brillo de una pantalla de proyección. Como investigador, Gabriel defiende los conjuntos de estructuras microscópicas, tales como el sistema de movimiento ciliar concebido por Hiroyuki Fujita en la Universidad de Tokio (*centro*). DARPA ha financiado a la Universidad de Cornell para que construya un sensor de aceleración empleando puntas de microscopio túnel de barrido opuestas entre sí. La punta superior estará suspendida sobre vigas de sección transversal 200 nanómetros (*derecha*).



ridad nacional al desarrollo de tecnologías para construir máquinas de tamaño reducido. El Ministerio de Industria y Comercio Internacional (MICI) anunció en 1991 una inversión próxima a 200 millones de dólares a lo largo de 10 años, con el fin de obtener actuadores y sensores miniaturizados para la fabricación de robots que inspeccionan tuberías y de catéteres inteligentes provistos de bisturíes para cirugía. Este proyecto, que recibe el nombre de tecnología para micromáquinas, es una de las primeras grandes tareas del MICI en las que se permite participar a compañías estadounidenses.

El MICI ha entablado contactos exploratorios con Texas Instruments relativos a un contrato sobre sistemas de control para micromáquinas. Esta empresa ha fabricado el que acaso sea el prototipo más notable de sistema micromecánico: un conjunto de dos millones de espejos metálicos microscópicos sobre pastilla de silicio. Cada espejo, de 16 micrometros de lado, se inclina hacia la posición de "abrir" o la de "cerrar" para controlar la cantidad de luz reflejada en una pantalla.

El programa del MICI no se limita a la producción masiva mediante litografía en silicio; cubre también un surtido de métodos para mecanizar piezas minúsculas de metal y de plástico, cortando y puliendo cada elemento individual. Por otra parte, Sumitomo Electric Industries, la primera empresa japonesa en explotar la técnica LIGA, la aplicará a la fabricación de pequeños micrófonos cerámicos para robots de inspección de tuberías.

Aunque 100 empresas solicitaron participar en el proyecto MICI, sólo una cuarta parte fueron seleccionadas. Sin embargo, algunas grandes compañías del Japón contemplan con poco entusiasmo el proyecto, e internamente continúan dedicándose a procesos de mecanización del silicio.

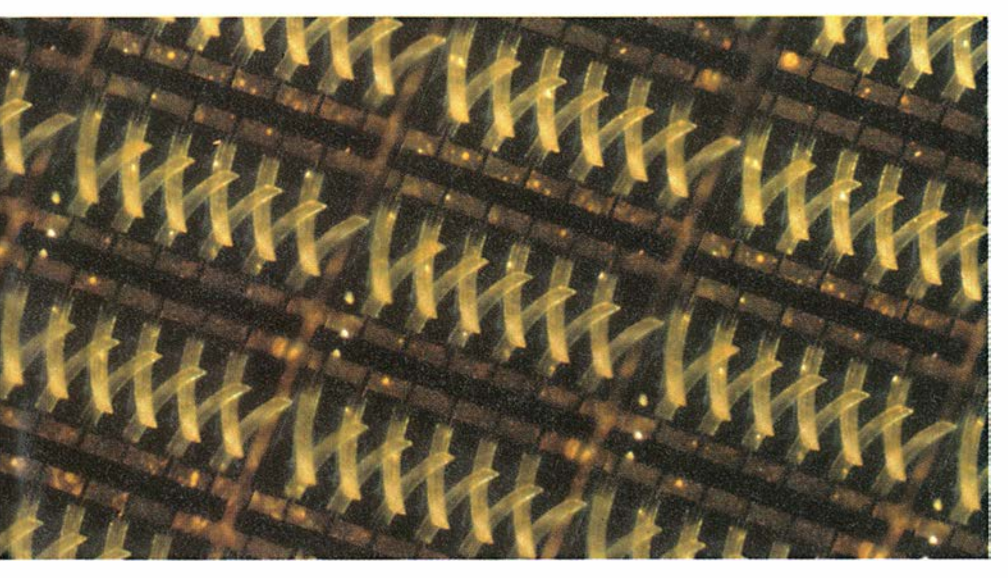
Uno de los participantes es Hitachi, el coloso de la electrónica diversificada, si bien su labor de investigación primordial sigue estando en el silicio. La empresa aumenta de cuatro a 10 su plantilla dedicada íntegramente a micromecánica, y construye una nueva sala blanca y una línea de procesado de semiconductores para esta técnica. Hitachi ya ha conseguido un nivel tecnológico básico fabricando prototipos de sensores de aceleración, que suministra a empresas automovilísticas.

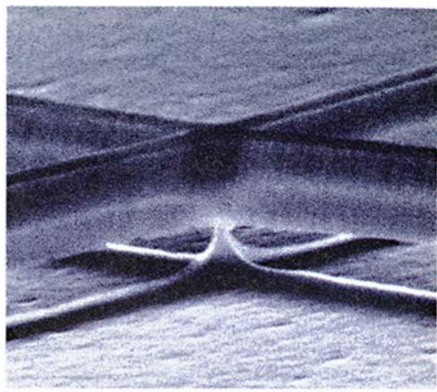
Kazuo Sato, que dirige este laboratorio, ejercita a los investigadores en los complejos matices del tema. Cada dos semanas organiza una reunión en la que se encarga a uno de ellos que estudie una ponencia de un congreso técnico reciente y la explique al grupo. A diferencia de la universidad, los proyectos guardan estrecha relación con la amplia oferta tecnológica de la empresa. A principios de 1992, Sato presentó, en la conferencia inaugural de un congreso internacional, un trabajo en el que describía un nuevo tipo de microválvula mediante el cual se lograba un control preciso de la cantidad de gas inyectado a una cámara de vacío; este proceso es esencial para la deposición, una a una, de capas atómicas en un sustrato con el fin de fabricar semiconductores que operen merced a los efectos cuánticos.

Mientras Hitachi construye una sala blanca, una empresa americana pionera en micromecánica ha abandonado este campo. Los laboratorios Bell de AT&T se numeraron entre las primeras empresas que lo abordaron, y una de las primeras que se han retirado. En el laboratorio ubicado en Holmdel se fabricó uno de los primeros micromotores, se investigó el silicio policristalino y se construyó un motor "con balanceo" en el que el rotor gira irregularmente alrededor de su eje, diseño que reduce los efectos adversos del rozamiento.

El programa de micromecánica de los Bell fue víctima de la decisión que adoptara la división de investigación de AT&T en el sentido de recortar su abanico de objetivos. En 1991, Kaigham J. Gabriel, su último especialista en micromecánica, dejó su empleo tras el cambio de área de investigación o el abandono de la empresa de cinco colegas suyos. Gabriel había ayudado a coordinar la actividad de los laboratorios Bell a mediados de los años ochenta.

Al año de dejar AT&T, Gabriel tomó las riendas de un programa gubernamental que le puede dar oportunidad de perfilar el desarrollo futuro de la micromecánica en Estados Unidos. Su nuevo puesto en la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (siglas en inglés, DARPA) consiste en hacer salir la mejor investigación académica al exterior de los laboratorios. La actividad de la DARPA representa uno de los principales programas que el gobierno de los Estados Unidos haya lanzado nunca en micromecánica, aunque el presupuesto de 20 millones de dólares para tres años sea todavía escaso, comparado con los gastos estimados en Japón y Alemania.





Mientras construía un micromotor en los laboratorios Bell, Gabriel tuvo que habérselas con la bidimensionalidad de un microactuador y la dificultad de tratar de extraer fuerzas útiles de una máquina con piezas circulares de diámetro menor que el de la cabeza de un alfiler. En consecuencia, en lugar de miniaturizar copias de maquinaria industrial pesada, como hace Henry Guckel, Gabriel trató de construir actuadores que pudieran aprovecharse del "aplanamiento" conseguido por la micromecanización en superficie.

Tiempos posmodernos

Muchas de estas ideas se pusieron en práctica durante un año sabático que Gabriel disfrutó en el Instituto de Ciencia Industrial de la Universidad de Tokio, cuando trabajaba en Bell. De sus largas discusiones con Hiroyuki Fujita, el más sobresaliente experto en microactuadores del Japón, y otros científicos, surgieron una serie de extraños dispositivos: membranas de unos cientos de micrometros de diámetro que se inflan y se desinflan sobre la superficie de la pastilla como diminutos peces globo, y paralelogramos parecidos a fósforos que se expanden y contraen por sus vértices. (Por su parte, Fujita ha producido actuadores que se despegan de la superficie y luego regresan a ella, igual que los cilios.) Una multitud de paralelogramos ordenados sobre la superficie de una pastilla puede producir fuerza y movimiento suficientes para manipular estructuras de dimensiones mayores. "Los actuadores individuales son estúpidos", comenta Gabriel. "Pero juntos se comportan como un dispositivo complejo." Los paralelogramos eran el tipo de piezas móviles que Gabriel había esperado consideraran los laboratorios Bell para conmutar una señal óptica de manera mecánica, evitando tener que convertirla en un impulso eléctrico y reconvertirla después a su forma óptica, como se hace ahora.

A finales del verano, volvió Gabriel a Bell para presentar el programa de la DARPA. Describió entonces a su antiguo patrón un plan que impulsará a los investigadores a que traduzcan en realizaciones de máquinas o sensores los años que han dedicado a perfeccionar su experiencia en microfabricación. Entre los contratos en curso figuran los siguientes:

- El sensor de aceleración más sensible construido hasta la fecha. La Universidad de Cornell lleva más de seis años perfeccionando un proceso fiable para obtener los elementos sensores y actuadores, harto difíciles de fabricar, destinados a los microscopios de sonda de exploración que se utilizan para escribir los nombres de empresas, átomo a átomo. Si todo sale bien, el equipo de investigación empleará grupos de puntas sensoras para detectar movimientos en cualquier eje causados por fuerzas que vayan desde unas pocas millonésimas hasta varias decenas de veces la de la gravedad. Un dispositivo de este tipo podría convertirse en la base tecnológica para una versión de bolsillo de los sistemas de navegación inercial que permiten a los pilotos conocer su posición en cualquier punto del planeta.
- Un dispositivo del tamaño de un reloj de pulsera, constituido por varias pastillas, que medirá una serie de parámetros (presión barométrica, temperatura, humedad, posición geográfica y presencia de gases como el dióxido de carbono), y podrá tener extensas aplicaciones en medicina, control industrial y control ambiental remoto. Todavía más importante es que este proyecto de la Universidad de Michigan podría ser el preludio de un nuevo sistema de diseño asistido por ordenador. El sensor de gases o la bomba se convertirían en un elemento más del diseño programado, junto al transistor y el condensador.
- Un actuador de la Universidad de Stanford cuyo movimiento sería perpendicular a la superficie de la pastilla. Sus dedos verticales podrían converger para agarrar tejidos biológicos o mover objetos pequeños secuencialmente, como si estuvieran en una cadena de montaje.

Dentro de otro programa, la DARPA presta apoyo a un experimento en el que distintos diseños de estructuras micromecanizadas en superficie procedentes de todo el país van a ser procesados en una fábrica de semiconductores en Carolina del Norte. Este ensayo permitirá comprobar si se ha alcanzado suficiente madurez en este campo como para sostener una fábrica a la que empresarios y universitarios puedan encargar pequeñas muestras de sistemas micromecánicos pagando una cuota nominal, de modo similar al programa DARPA para la industria microelectrónica. Puesto que se cuenta con la base ya establecida por la microelectrónica, pueden conseguirse progresos relativamente pronto en esta materia.

En un viaje reciente por Alemania, Henry Guckel, el defensor de la técnica LIGA, escuchó la inevitable pregunta sobre la aplicación de sus minúsculos motores. Guckel recomendó paciencia, explicando a su audiencia de industriales y académicos que podrían obtener las micromáquinas ahora mismo o más adelante, y que serían útiles en cualquiera de los dos casos. Pero tal vez sea preferible esperar: "Todo depende del coche que quieran ustedes conducir, un Panda o un Mercedes".

Ciencia y empresa

El factor verde

En la empresa

Una cosa es el principio y otra su aplicación práctica. Todos están de acuerdo en que hay que prestar atención al entorno en los procesos industriales, en reciclar las basuras y reducir los desechos de fabricación. Pero algunos han dado un paso más, y hablan de la "fabricación verde" o "fabricación para el medio ambiente" (FME).

Lo mismo que las viejas proclamas ("calidad ante todo", "simplificación del proceso", etcétera), FME persigue que los ingenieros ahonden en las implicaciones ambientales de un producto y su manufactura desde las mismas fases iniciales de su proyecto.

Se quiere que los responsables tengan presente, por ejemplo, el deterioro del medio que provoca la extracción de materias primas, la toxicidad de los productos o subproductos fabricados, la probabilidad de reutilización de los mismos, su reciclaje y otros puntos por el estilo. La idea comienza a prender. Y así hasta institutos gubernamentales y fuerzas armadas de ciertos países comienzan a incluir las consecuencias para el entorno en sus programas logísticos.

La propia industria electrónica, un advenedizo en estas preocupaciones, ha tomado cartas en el asunto, incluso buscando el éxito competitivo. Los fabricantes japoneses esperan una mayor participación en el mercado a causa de su "verdor"; venden también tecnologías de limpieza y control. Por su parte, las empresas norteamericanas están ganando puntos verdes. DEC y Xerox, por ejemplo, aceptan equipos antiguos de los clientes; en algunos casos, Xerox restaura y revende las máquinas. Hacia finales de 1992, IBM tenía programado anunciar a los clientes que podían devolver cualquiera de sus productos. Esta y otras empresas rotulan ya los componentes por su clase de material para facilitar el reciclado e investigar técnicas de desmontaje y reutilización de productos antiguos.

Pero son pocos los fabricantes de equipos electrónicos dispuestos a invertir en la revisión de sus propios proyectos; a modo de ejemplo, en sustituir tornillos y tuercas con que se aseguran las cajas de ordenadores por lengüetas de plástico. "Nadie debe llamarse a engaño creyendo que esto va a ser una transición suave", repiten en el sector. Nadie ha resuelto todavía el problema de traducir los datos ambientales a información para los sistemas de análisis que los equipos de proyectistas pueden usar. Será costoso incorporar la consideración ambiental en las técnicas de proceso, pero quizá lo sea más tirar por la borda equipos y productos químicos con las futuras normas legislativas, restrictivas, de los países.

Explotación aviar

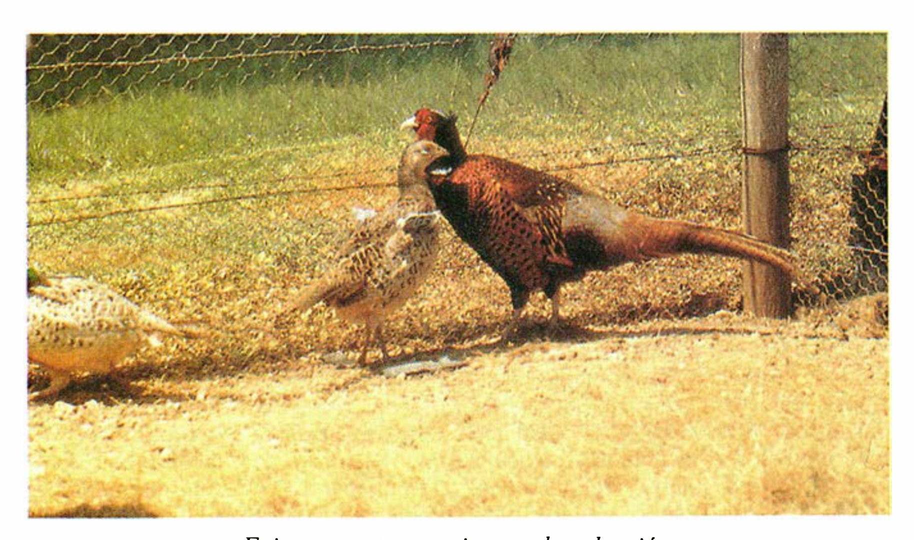
Del faisán y otra caza menor

Brillat-Savarin situaba el faisán por encima de la becada a condición de que se consumiera transcurridos ocho días largos después de su sacrificio. Si muchos de entre nosotros ya no aprecian un husmo tan prolongado, reservamos, sin embargo, a los faisanes un lugar preferente... lo que motiva los estudios de selección efectuados en la estación avícola de Nouzilli por Jean-Michel Melin y sus colaboradores del Instituto Nacional francés de Investigaciones Agrarias (INRA).

En Francia, el fomento de la población de caza se ha venido cuidando desde hace unos veinte años, y cada año se sueltan 15 millones de faisanes y 5 millones de perdices. ¿Cómo criar a estos animales para que puedan sobrevivir en plena naturaleza? ¿Cómo seleccionar las variedades más adaptadas? En 1975 se descubrió la posibilidad de seleccionar los faisanes en razón de su comportamiento juvenil, es decir, de acuerdo con la actividad mostrada por esas aves a los tres días de edad, o la longitud y la velocidad del vuelo a la edad de 18 semanas. Se había observado una correlación positiva entre la prueba precoz a los tres días y las cualidades del vuelo a las 18 semanas.

Ahora bien, el período de incubación, inicialmente fijado en 25 días, practicaba una selección imprevista y nefasta. Los trabajos en curso confirman que los faisanes más activos tienen un período de incubación natural de 26 a 28 días, mientras que los individuos inactivos, asociales y poco competitivos salen del huevo en 25 días. Además, los faisanes inactivos tienen una masa muscular pectoral (el equivalente del *magret* del pato) menos desarrollada que sus congéneres activos.

¿Cómo repoblar eficazmente cuando se hayan seleccionado las estirpes activas? Los estudios de comportamiento han mostrado que las buenas incubadoras son también las buenas ponedoras: y hacia ellas se orienta la selección. Por otra parte, el estudio del faisán en el medio natural ha revelado que las poblaciones naturales están constituidas por tres clases de machos: los territoriales, los no



Faisanes en una pajarera de selección.

territoriales (que no poseen territorio y vagan en los territorios de los anteriores) y los satélites, que viven en el límite de los territorios en ciertos períodos del año. Las hembras forman los harenes de los machos territoriales (de una a diez hembras por macho).

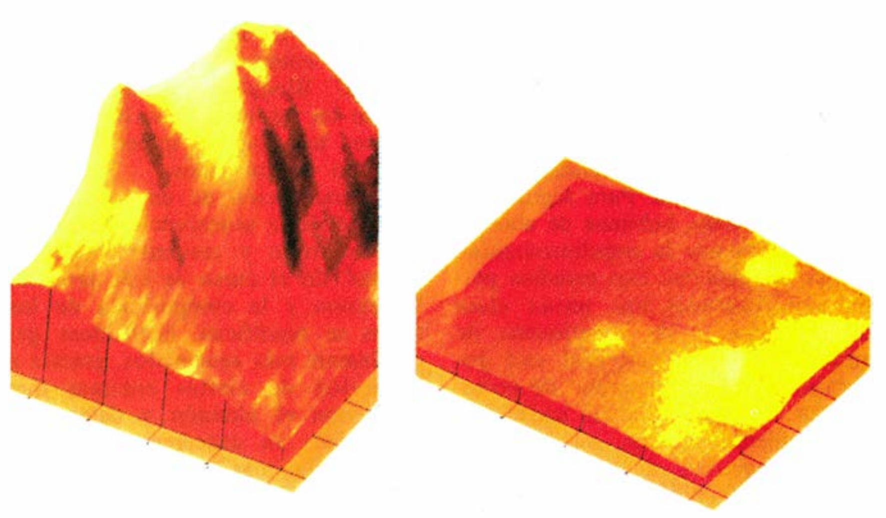
Teniendo en cuenta la existencia de todos esos grupos, se obtiene la repoblación más eficaz dejando libres 10 machos por cada 12 a 15 hembras, según le vegetación; la densidad óptima depende de los recursos alimentarios y especialmente del perímetro de los límites bosque-campo abierto (los territorios de los machos territoriales están delimitados por claros o setos).

Se ha potenciado el adiestramiento y la alimentación de los faisanes. La puesta en barbecho de tierras de cultivo permite planear explotaciones donde los faisanes pudieran volar y, a la vez, desarrollar sus músculos pectorales. Lo que supondría un claro avance, pues los faisanes criados en completo enclaustramiento consumen 1,7 veces más que los explotados en pajareras: a la edad de 17 semanas, se necesita un kilo de alimentos suplementarios para obtener el mismo crecimiento. Además, la cría en pajareras produce faisanes de peso mayor a la edad de cinco meses, ya que acumula reservas energéticas para soportar las condiciones de la intemperie.

Paralelamente a los estudios de alimentación, los agrónomos de Nouzilly prosiguen las selecciones. Las hembras se confinan en pequeñas cajas en las pajareras, donde el macho se mueve libremente. Se conocen así los progenitores de cada huevo. En otras pajareras mayores (40 por 14 metros) se estudia el éxito de eclosión en función de las proporciones de machos y hembras.

Para el faisán de caza, la selección de estirpes experimentales ha comenzado ya a dar sus frutos. El número de huevos por hembra ha aumentado de 30 a 110 en los últimos diez años, sin que se degrade la aptitud de vuelo. Entre las aves de repoblación, por otra parte, los expertos del INRA realizan el seguimiento, en 121 hembras, de las capacidades de nidificación y de incubación, la fecha del primer huevo en el nido, la duración del período de incubación, la viabilidad de los polluelos y su cría por la madre.

Los primeros resultados son alentadores: 80 por ciento de las hijas reproductoras con buenos resultados proceden de madres buenas incubadoras en 1990. Finalmente, para los faisanes de consumo, el número de huevos incubados por hembra alojada en la jaula ha pasado de 39 a 210 en 268 días, con 254 huevos para la mejor. (Jean-Michel Melin, del Instituto Nacional francés de Investigaciones Agrarias.)



Imágenes al microscopio atómico de dominios magnéticos de un material orgánico ferromagnético depositado bajo un campo magnético perpendicular al substrato (izquierda) *y paralelo a éste* (derecha).

Imanes de plástico

El ferromagnetismo de los derivados de la polianilina

Desde que el inglés William Gilbert publicó su *De Magnete* en 1600, sólo los cuerpos minerales parecían tener el patrimonio de las propiedades magnéticas. Sin embargo, hacia finales de los años setenta de nuestro siglo, el estudio del poliacetileno, donde se alternan los enlaces dobles y los simples entre átomos de carbono, mostró que las moléculas orgánicas no eran necesariamente aislantes. Los químicos sintetizaron después diversos polímeros conductores, tales como el politiofeno o el poliparafenileno, con la esperanza de obtener baterías ligeras, materiales antiestáticos, protecciones contra las radiaciones, etcétera.

Diez años después, las dificultades de puesta a punto industrial de los dispositivos con polímeros conductores impulsaron la exploración de nuevas clases de polímeros de estructura química ajustable, basadas principalmente sobre el esqueleto de la polianilina. Después de tres años de estudios, el grupo de polímeros de la Sociedad Alcatel Alsthom Recherche ha puesto a punto nuevos polímeros y copolímeros de anilina que gozan de propiedades electromagnéticas originales; una, el ferromagnetismo (la posibilidad de imanarse). Estos compuestos, patentados en 1991, tienen imanaciones de saturación y campos coercitivos (el campo magnético externo más elevado que soportan sin desimanarse) suficientes para prever aplicaciones industriales.

Desde hace años se venía soñando con el ferromagnetismo macromolecular, en particular por el grupo de Korshak y Ovchinnikov, del Instituto de Química Física de Moscú. Después de ensayos de síntesis, se había presentido un débil ferromagnetismo para los derivados del poliacetileno. En 1988, en Kyoto, Miyazaki había detectado trazas de ferromagnetismo en la polianilina, pero sus métodos de síntesis por pirólisis no daban resultados reproducibles: las débiles imanaciones obtenidas podían ser imputables a contaminación por los elementos llamados de transición, tales como el hierro, el níquel u otros.

Nosotros hemos reemprendido el estudio de los derivados de la anilina modificando las cadenas por oxidación-reducción y situándolas en las condiciones de acido-basicidad adecuadas: los electrones de los átomos de nitrógeno vecinos de un ciclo bencénico quedan libres en el conjunto del polímero y aseguran entonces la conducción eléctrica.

A fin de aumentar esta libertad, hemos injertado en la cadena moléculas terminadas por un grupo ácido, tal como el grupo sulfóxido SO_3H: en presencia de este ácido, el átomo de nitrógeno vecino capta un protón H^+, lo que aumenta, a su vez, la conductividad eléctrica de la cadena del polímero.

Había dos estrategias previsibles:

una era insertar un brazo ácido sobre un polímero ya elaborado (pero, desgraciadamente, este brazo termina por enlazarse con los átomos de nitrógeno); otra era sintetizar monómeros injertados y copolimerizarlos después con la anilina. Para seguir este segundo método, hubimos de abordar en el laboratorio la copolimerización de los monómeros. Los estudios permitieron construir una nueva clase de polímeros y de copolímeros de anilina, cuya conductividad está gobernada por el intercambio de protones en el interior de las cadenas o entre cadenas vecinas, pero el coste de los reactivos de síntesis hacía prohibitivo el precio de los productos obtenidos; además, si bien la conformación de los injertos optimizaba la conductividad (que alcanzaba una docena de siemens por centímetro), los polímeros sólo eran estables a temperaturas inferiores a 130º C: las aplicaciones a telecomunicaciones o a transporte de energía continuaban siendo imposibles.

Después del estudio de los comonómeros utilizables y de las vías de síntesis, hemos llegado, en 1991, a una clase de copolímeros que poseen las propiedades de conductividad buscadas, así como el ferromagnetismo. Un breve estudio sobre el SQUID de la Universidad de Orsay por R. Clément y Léaustic confirma un ferromagnetismo macromolecular. El examen mediante microscopía de fuerza atómica ha mostrado, en capas de polímero depositadas sobre vidrio bajo un campo magnético perpendicular a éste, zonas más espesas que en los demás sitios, que parecen corresponder a dominios magnéticos; cuando el depósito se hace en campo magnético paralelo al substrato, el espesor de la capa de polímero es regular. (S. Galaj y Alain Le Méhauté, de la compañía Alcatel Alsthom Recherche.)

El etileno y los tomates

Problemas de maduración

Las campesinas que acuden con sus cestas al mercado saben que basta una fruta madurada en exceso para estropear a todas sus compañeras. La explicación técnica del contagio estriba en lo siguiente: al término de su desarrollo, la fruta produce etileno, señal química que desencadena el proceso de maduración y que se difunde en forma gaseosa de un fruto al otro. Como el etileno estimula su propia síntesis, la maduración de los frutos en la cesta adquiere entonces un carácter "explosivo". Bloqueando la síntesis del etileno en las tomateras, los investigadores han logrado impedir la maduración de los frutos.

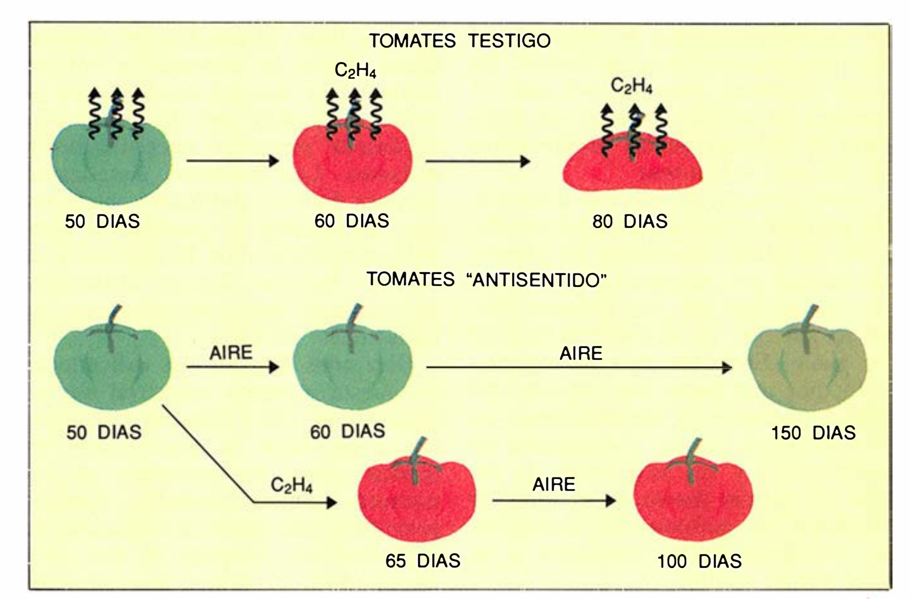
La maduración de un fruto es el preludio de la senescencia, fase final del desarrollo y crecimiento de las plantas. En el curso de este proceso, la textura y la composición de los frutos se modifican, haciéndose generalmente más azucarados, gracias a la acción de ciertas enzimas que convierten el almidón y determinados ácidos en azúcares. Los frutos son también más blandos: las pectinasas hidrolizan las paredes celulares, y sus pigmentos se modifican por la degradación de la clorofila y la síntesis de carotinoides. Estos fenómenos, que resultan de la expresión de numerosos genes, consumen energía: la maduración de los frutos requiere una activación de la respiración celular, marcada por un fuerte desprendimiento de CO_2.

Este complejo proceso de maduración se efectúa bajo el control del etileno, molécula de estructura simple (C_2H_4) que interviene en otros acontecimientos biológicos importantes, como la floración, el crecimiento de los tallos y de las raíces, la sensibilidad al peso e incluso la caída de las hojas.

Para atenuar los efectos del etileno sobre la maduración de los frutos, se ha intentado su ventilación o el bloqueo de su acción (iones Ag^+, CO_2); estos métodos se han revelado frecuentemente costosos y poco eficaces, y una alternativa consistiría en impedir la producción endógena del etileno: es el resultado espectacular arriba mencionado. Se ha logrado inhibir, en tomateras transgénicas, la producción de una enzima, la ACC-sintetasa, que cataliza la síntesis de un precursor del etileno.

En el curso de la maduración del tomate normal, se expresan dos genes homólogos que codifican una actividad ACC-sintetasa: Se trata de los genes *ACC2 y *ACC4. Las tomateras transgénicas que los investigadores han creado expresan la secuencia complementaria del ARN mensajero del gen ACC2, es decir, el ARN mensajero antisentido. Las plantas transgénicas dejan de expresar ya los genes ACC2 y ACC4 y están desprovistas de actividad ACC-sintetasa: la producción de etileno queda anulada.

Mientras que los frutos testigo producen etileno aproximadamente 50 días después de la polinización y están maduros en el sexagésimo día, los frutos "antisentido" todavía están verdes el centésimo día, y poseen todas las características de los frutos inmaduros: se evita la síntesis del licopeno (carotinoide que confiere un color anaranjado) y la degradación de la clorofila; ni se activa la respiración, que se observa en los frutos en curso de maduración. El tratamiento de estos frutos "antisentido" con etileno, durante al menos seis días, transforma por entero el fenotipo salvaje: maduran y presentan la



Fenotipo de los tomates "antisentido". Si se tratan con etileno durante 6 a 15 días los tomates transgénicos, que no producen este gas, se desencadena su maduración completa. La retirada del etileno permite conservar los frutos sin que se produzca una maduración excesiva. El número de días se cuenta a partir de la polinización.

textura, color, aroma y compresibilidad de los frutos testigo.

Además, la restauración del etileno no va seguida de maduración excesiva, el problema clásico de las variedades no manipuladas. Se puede ya, controlando la producción de etileno, programar la maduración de los frutos "a voluntad", sin que sea necesario recogerlos verdes.

El estudio del modo de acción del etileno ofrece un doble interés. Por un lado, nos acerca a moléculas de estructura sencilla y capaces de regular fenómenos biológicos tan dispares como la maduración del fruto y el crecimiento. Existe, por otra parte, el interés de impedir la maduración excesiva de los frutos durante su transporte y comercialización. La utilización del ARN mensajero ACC2 antisentido no bloquea más que el 99,5 por ciento de la producción del etileno, y los frutos acaban igualmente por amarillear (pero sin que exista una verdadera maduración).

La obtención de mutantes auténticos por recombinación homóloga (técnica que inactiva el gen endógeno de la planta) debería autorizar un control absoluto de la producción de etileno. Este control podría evidentemente extenderse a los mecanismos moleculares que traducen la señal aportada por el etileno. No conocemos todavía el sistema de recepción de esta señal, aunque cabe presumir que los genetistas deseosos de dominar el problema de la maduración de los frutos se afanarán por descubrirlo. (Pierre Leroy, del Laboratorio de genética molecular de eucariotas, de Estrasburgo.)

Soporte lógico

Programación con retales

En el laboratorio donde unos 140 ingenieros de Microsoft están trabajando en un proyecto cuyo nombre en clave es Cairo, su mascota —la silueta de un camello recortada en contrachapado— descansa pacientemente apoyada contra la pared del pasillo. Embalado junto a él hay un paquete de Tylenol. "El camello pasó una mala racha", bromea James Allchin, vicepresidente de Microsoft para sistemas avanzados y director de Cairo.

Con otras compañías, Microsoft se apresta a crear una forma diferente de sistema operativo basado en "programación orientada al objeto". El camello es testigo de los dolores de cabeza y las largas horas de intenso trabajo. "Tenemos que hacer algo para llegar donde cada persona pueda construir su propio programa", dice Allchin. "Para que la gente rinda más y se halle más cómoda en la edad de la informática, no valen los programas enlatados".

Por el momento, construir programas de ordenador es artesanía que reclama un trabajo atento y cuidadoso. Microsoft y otros fabricantes se proponen fomentar su propia productividad. Pero elaborar soporte lógico es tarea todavía más irritante para quienes tienen más que suficiente con saber aplicarlo. Los primeros de esa lista son los fabricantes de equipos, que deben sazonar sus productos cada vez más con complicados programas, y los usuarios, que se encuentran constreñidos por las reglas de los programas para realizar sus tareas específicas.

La solución es obvia: elaborar el soporte lógico de suerte tal que puedan reutilizarse ciertas secciones de códigos. Pero el lograr eso entraña una tremenda dificultad. La reutilización ha estado en la agenda de los investigadores desde los años sesenta, pero sólo ha dado pasos vacilantes. Ahora "es el momento ideal, contamos con la técnica necesaria", afirma Daniel Sabbah, adscrito al Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM.

La programación orientada hacia el objeto (POO), la idea de moda, encabeza la lista de herramientas que ayudan a construir el nuevo mundo feliz del soporte lógico reutilizable. Los objetos son conjuntos de datos y procedimientos y métodos relacionados con ellos (que describen cómo manipular los datos). A modo de los bloques de un juguete de construcciones, de un lego, tales componentes encapsulados pueden encajarse entre sí o separarse para formar diferentes sistemas, supuesto que todos usen las mismas interconexiones. Los objetos poseen otros atributos: algunos encajan en "clases" con objetos similares; otros "heredan" las características.

En un sistema operativo del estilo del Cairo, los objetos prometen dotar al usuario de una especial capacidad de "unir los puntos" para realizar el trabajo de que se trate. Por ejemplo, una persona podría ver un "botón" en la pantalla que representa un documento —un informe de ventas— y otro botón que representa una lista de envío, explica Allchin. Para enviar el informe, un individuo necesita sólo dibujar una línea entre ambos botones con el ratón. Pero el usuario podría también añadir una advertencia: "si las cifras de ventas han bajado, enviar sólo a los principales directivos". Los objetos comprobarán los números y dirigirán el documento de acuerdo con ello. Lo que es más, el sistema hará uso de objetos dondequiera que estén almacenados: en el ordenador de sobremesa del usuario o en otra parte de una red de ordenadores.

Cairo no se presentará en público hasta dentro de un año. Mientras tanto, en Microsoft y otras empresas de proyectos se continúa trabajando con la "semántica", o descripciones precisas de la naturaleza de un objeto específico, que se encuentra en mantillas. Hay sin embargo un manojo de herramientas, además de los objetos, que los investigadores esperan ayuden a allanar el camino del soporte lógico reutilizable. Daniel Sabbah señala la utilidad de los compiladores (que trasladan programación de un lenguaje a otro) y a los lenguajes de alto nivel, más abstractos, que permiten a los usuarios expresar sus trabajos en el lenguaje de su negocio, y no en el peculiar de los ordenadores.

En cierto proyecto, los investigadores de IBM escribieron un "lenguaje de reglas" que podía optimizar cualquier sistema de ecuaciones a parámetros dados. Con ese lenguaje, elaboraron después un programa experimental de opciones de compraventa de valores que recomendaba comprar y vender acciones dadas ciertas condiciones. Los corredores potenciales no necesitarían conocimientos especiales de programación para operar con el sistema; además, podría aplicarse con igual facilidad para optimizar las condiciones que gobiernan el proyecto de circuitos eléctricos.

También son prometedores los "marcos", o lo que David Garlan, adscrito a la Universidad Carnegie Mellon, llama "arquitecturas programables". En vez de conectar entre sí los componentes, los proyectistas tratan primero de descubrir —y después reutilizar— el esqueleto común a un conjunto de productos relacionados.

Las hojas de cálculo son un ejemplo de libro, señala Garlan. Cuando los usuarios ajustan las hojas de cálculo a sus necesidades, están "reutilizando" una considerable porción del código preescrito. De manera análoga, los fabricantes de productos hallarán enormes oportunidades de reutilizar claves si primero identifican una arquitectura programable común en una familia de productos, sugiere Garlan.

George A. Carlson

Avistando variables Cefeidas

No todas las estrellas brillan con la regularidad del Sol. Hay una pequeña fracción de ellas cuya luminosidad fluctúa visiblemente. Pero tales estrellas están lejos de ser meras curiosidades; antes bien, ofrecen una copiosa información, no ya de ellas mismas sino del universo en su conjunto. Entre las más útiles para los astrónomos se cuentan las llamadas Cefeidas de tipo I, magníficos indicadores de distancias. Débese esta propiedad a la existencia de una relación definida entre el período de variación de una Cefeida y su luminosidad: cuanto más largo es el período, tanto mayor es el brillo intrínseco de la estrella. Así, hallando el período de una Cefeida y midiendo su brillo aparente, se deduce su distancia a la Tierra.

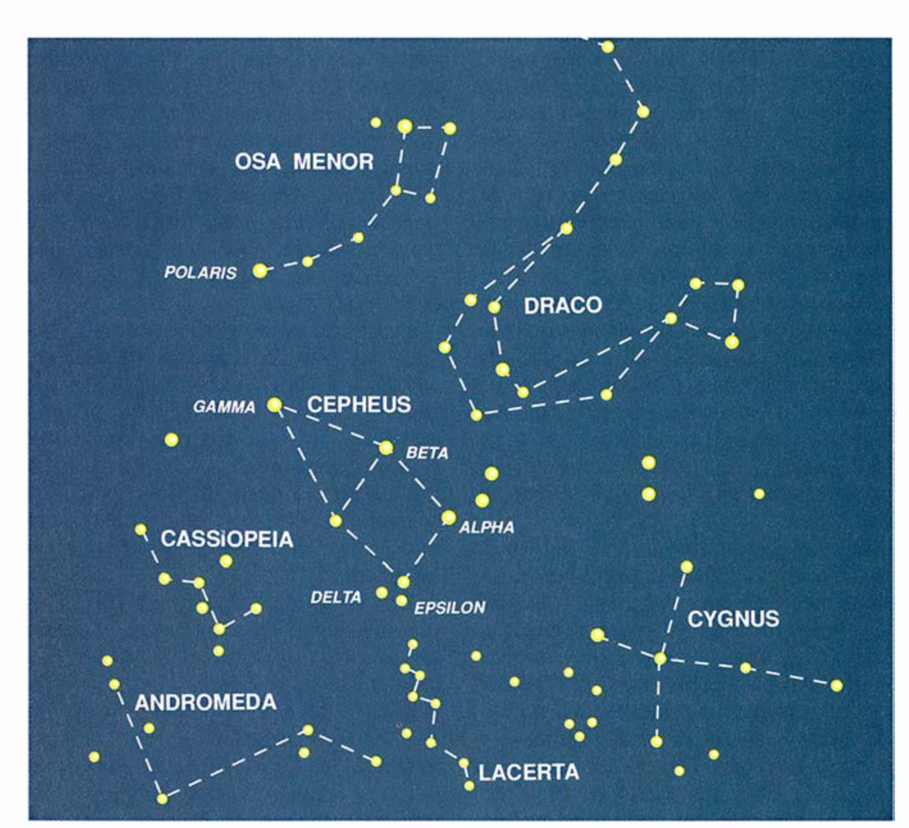
No suele ser tarea fácil obtener, por este procedimiento, unos valores aceptablemente exactos. Por culpa del orden de las magnitudes que intervienen en la relación período-luminosidad, los cálculos de la distancia pueden estar afectados de un coeficiente de error de dos o tres. Para corregir ese margen se acostumbra recurrir a la observación de varias Cefeidas próximas. Yo descubrí 29 de ellas en la galaxia NGC 3109, cuyas magnitudes aparentes con máximo brillo llevé a la curva período-luminosidad. Obtuve así una distancia de 1,9 megaparsecs. Pero incluso esta cifra es sólo aproximada, pues le falta la corrección por absorción en la materia interestelar. Unas mediciones de distancia precisan potentes telescopios, filtros y complejas técnicas para extrapolar las mediciones de un cuerpo celeste a otro. De por sí, la determinación de distancias es una tarea que más vale dejar a los profesionales.

Sin embargo, los aficionados no tienen por qué sentirse del todo fuera de juego. Para nosotros es fácil determinar el brillo de una Cefeida a lo largo del tiempo y disponer esa información en forma de curva de luz. A la hora de observar estrellas variables, uno de los recursos más útiles es el *Astronomical Almanac*. En esta publicación de consulta se ofrece una relación de las estrellas variables perceptibles a simple vista. La información comprende el nombre de cada estrella, su clase y posición y su período de variación. Cita asimismo el último momento de luminosidad máxima, el cual puede emplearse para predecir el brillo máximo futuro.

El brillo de los astros se expresa empleando la escala de magnitud. En esta escala cada unidad corresponde a una diferencia de luminosidad de 2,5 veces. Las estrellas poseen unos números de magnitud mayores cuanto más débiles son y los objetos más brillantes del firmamento son de magnitud negativa. Por ejemplo, el Sol luce con una magnitud de –26. A simple vista pueden detectarse objetos de magnitud seis.

En el almanaque los tiempos se dan en días julianos, números decimales consecutivos relativos a las fechas y épocas de los acontecimientos. Las fechas julianas son mucho más prácticas que las del calendario común. Para obtener el intervalo entre sucesos, basta con sustraer las fechas. En la sección B del almanaque se exponen las fechas ordinarias equivalentes.

La estrategia general para observar las Cefeidas variables consiste en medir el brillo a lo largo de muchos ciclos. Para reunir los datos acerca de la variación de la luminosidad



1. DELTA CEPHEI se encuentra en la constelación de Cefeo, cerca de la Osa Menor. Compárese su brillo con los de Beta y Epsilon Cephei. Las estrellas se designan en función de su brillo empleando el alfabeto griego.

GEORGE A. CARLSON enseña astronomía en el Colegio Citrus de Glendora, en California. Se doctoró en física por la Universidad de California en Davis.

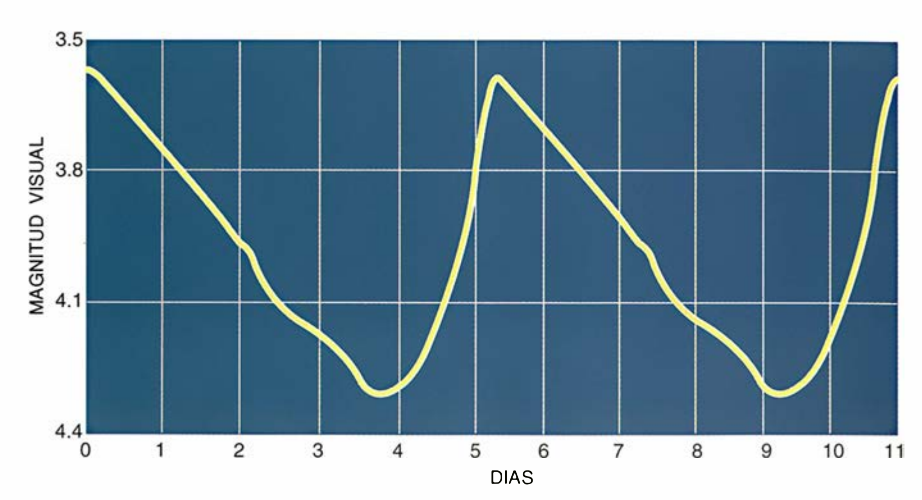
hay dos procedimientos. El primero se reduce a observarla a simple vista y operar estimaciones múltiples. El segundo consiste en fotografiarla y determinar su brillo midiendo el tamaño de la imagen.

En uno y otro caso, se comienza haciendo la primera serie de mediciones, muy cercanas unas de otras, a lo largo de uno o dos ciclos, de tal modo que podamos hacernos una idea aproximada del período. Luego dejaremos pasar algunos ciclos y haremos una segunda serie de mediciones. Pero no hay que esperar demasiado: cuando el número de ciclos multiplicado por la incertidumbre del período sea igual a un período, en la cuenta de éstos se nos habrá escapado uno. Antes de entrar en una tercera tanda de observaciones, haremos un alto durante algunos períodos más. Sabiendo cuántos ciclos hay entre las observaciones, éstas podremos "enfrentarlas" para deducir un valor fiable del período. Me serví del programa de ordenador cuyo algoritmo se describe en el recuadro.

El procedimiento para observar Cefeidas a simple vista se basa en una idea sencilla que se atribuye al astrónomo alemán Friedrich W. A. Argelander. Consiste en elegir algunas estrellas ordinarias (no variables) para contrastarlas con la Cefeida. Para ello, las magnitudes aparentes de las estrellas de referencia deben cubrir todo el campo de variación del brillo de la variable. Aquéllas deben estar ubicadas en el firmamento lo más cerca posible a esta última, de tal modo que cada estrella de referencia y la variable se encuentren en el mismo campo visual. Lo ideal es que las magnitudes de las estrellas de referencia estén escalonadas en saltos de 0,3 a 0,5. Por mi parte, estas estrellas las designo en orden alfabético, asignando la letra "a" a la más brillante.

En el momento de comparar, decidiremos cuáles son las dos estrellas de referencia cuyas magnitudes ahorquillan las de nuestra variable. Luego trataremos de estimar a la décima el brillo de la Cefeida dentro del intervalo de referencia. Si estimamos que la magnitud de una variable es de 0,4 entre las de las estrellas de referencia b y c, escribiremos que la magnitud de aquélla es b4c (taquigrafía del observador de Cefeidas). Esta podemos pasarla a su valor real interpolando entre las magnitudes conocidas de b y c.

Desde luego, puede que las estrellas de referencia idóneas no se hallen lo bastante cerca de la variable. En tal caso, habrá que mover la vi-

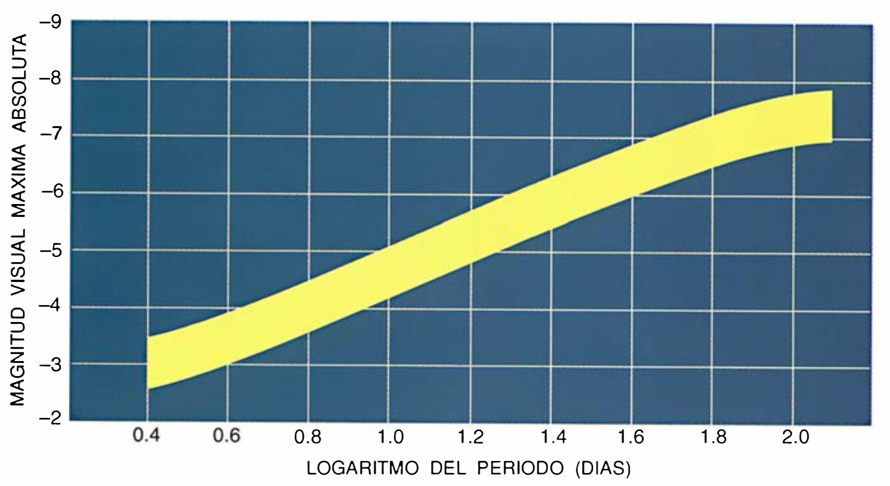


2. LA CURVA DE LUZ de Delta Cephei muestra que su brillo varía aproximadamente en una unidad de magnitud a lo largo de un período de cinco días.

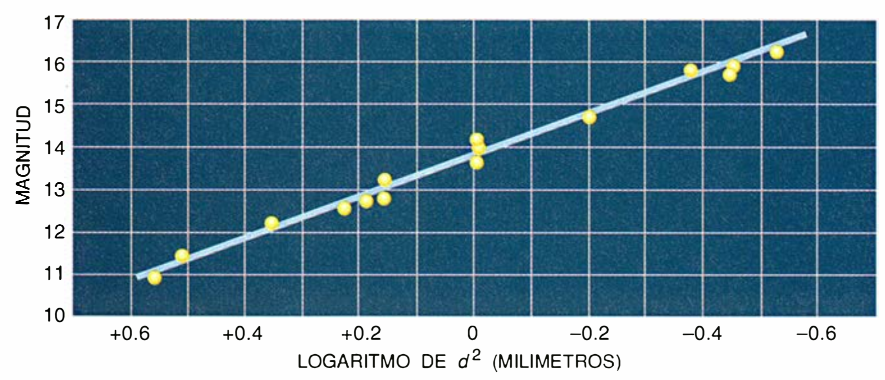
sual en vaivén de una estrella a otra para estimar el brillo relativo. Pero la memoria visual es muy corta, y cuando queramos concentrarnos en la segunda estrella, nuestra vista habrá "olvidado" el brillo que apreció en la primera. A ello se suma el hecho de que el centelleo de las estrellas dificulta más la evaluación de su brillo. Pese a todo, la práctica mejorará nuestra habilidad a este respecto. En realidad es posible averiguar el período de una estrella variable con una precisión aceptable sólo con tres niveles de brillo.

Probemos la técnica con Delta Cephei, cuya magnitud aparente oscila entre 3,48 (máxima) y 4,37 (mínima). Busquemos Beta Cephei (magnitud 3,32) en un mapa astronómico y usémosla como estrella de referencia a. Como estrella de referencia b recurriremos a Epsilon Cephei, de magnitud 4,19. Durante una o dos semanas observaremos Delta Cephei una vez por noche y anotaremos la hora y su brillo en comparación con a y b. Si ese brillo lo hallamos entre los de a y b, escribiremos sin más a5b. Estos tres valores pueden darnos una estimación grosera del período. Con un poco de práctica y algo de suerte con la meteorología, cualquiera debe ser capaz de afinar sus estimaciones. Si Delta Cephei no es fácilmente visible desde nuestra posición, el almanaque relaciona otras Cefeidas y otras estrellas adecuadas como referencias comparativas.

La fotografía brinda un medio más exacto para registrar la variabilidad de las Cefeidas. Como la película fotográfica puede detectar objetos imperceptibles a simple vista, aquélla nos permite realizar estudios fotográficos de Cefeidas que ni siquiera consten en el almanaque. Necesitaremos instalar en nuestro telescopio una cámara fotográfica y un mecanismo de arrastre cronométrico (es decir, un dispositivo de segui-



3. RELACION período-luminosidad de las Cefeidas de tipo I, para las longitudes de onda del visible; permite inferir la distancia a la que se halla una Cefeida. Cada período posee una gama de magnitudes posibles.



4. LA RECTA DE CALIBRACION de las estrellas del cúmulo NGC 6940 relaciona los diámetros de las imágenes (d) *con las magnitudes aparentes.*

miento del movimiento aparente del objeto celeste en cuestión).

Para una variable como Delta Cephei y un telescopio pequeño, un tiempo de exposición típico sería de unos 10 segundos. Sin embargo, hay que hacer varias tomas con diferentes tiempos de exposición y elegir el mejor.

En la película, la intensidad luminosa de una estrella queda impresa por el tamaño de su imagen; cuanto mayor es ésta, más brillante es la estrella. Así pues, habrá que correlacionar el diámetro de cada imagen estelar con una estrella cuya magnitud se conozca (las magnitudes figuran en el almanaque y los manuales). En mis clases de astronomía esa operación la muestro a mis alumnos valiéndome del cúmulo abierto NGC 6940. Empleo un comparador de 12 aumentos (una lupa) para medir las imágenes de las 15 estrellas del cúmulo sobre una positiva ampliada.

El comparador contiene un retículo dotado de una escala lineal con divisiones de 0,1 mm y permite estimar los tamaños con una precisión de algunas centésimas de milímetro.

La representación gráfica de las magnitudes de esas estrellas en función del logaritmo del cuadrado de los diámetros da una recta. Una vez calibrada ésta, podremos averiguar la magnitud de cualquier estrella que esté en nuestro campo visual. Para ello basta con medir el diámetro de la estrella y llevarlo a la recta de calibración. Cada foto habrá que calibrarla así.

Cabe que las magnitudes de las estrellas que necesitemos para la calibración no figuren en ningún manual. En tal caso, deberemos calibrar esas estrellas con respecto a otras cuyas magnitudes sí estén. Calibración secundaria que haremos sólo una vez. Luego emplearemos estos patrones secundarios para medir la variable.

Para garantizar la precisión en las calibraciones secundarias deben tomarse algunas precauciones: hacer todas las tomas con el mismo tiempo de exposición, realizarlas con el mismo rollo y trabajar con copias en negativo, ya que es más fácil medir imágenes negras sobre fondos claros que al revés. (Las copias las hago a partir de negativos de contacto de los negativos originales.) Por último, corregiremos el efecto que introducen los distintos caminos ópticos que atraviesa la luz en la atmósfera.

Lo mejor es recurrir a la conversión sistemática de las magnitudes que tenemos a los valores que tendríamos si estuviéramos mirando directamente hacia arriba. Para las longitudes de onda visibles, esa corrección vale 0,14 (sec z − 1), donde z es el ángulo entre zenit y el campo fotografiado. Calibradas ya nuestras fotos, podremos averiguar el período con el algoritmo que se expone en el recuadro.

Pueden construirse curvas de luz representando la magnitud en función de la fase. Recuérdese que las magnitudes más pequeñas (mayores brillos) deben llevarse a la parte superior del eje de ordenadas. Tradicionalmente las curvas de luz se representan mostrando dos ciclos completos.

Los lectores que deseen recibir un juego de datos muestra y el programa para determinar el período (escrito en FORTRAN) deberán enviar un sobre tipo comercial con su dirección escrita y franqueado a Prensa Científica, S. A., Taller y laboratorio, Muntaner, 339 pral. 1.ª, 08021 Barcelona.

Determinación del período

El programa se basa en el redactado por Hugo C. Marraco y Juan C. Muzzio, de la Universidad de La Plata (Argentina). Se expone lo esencial del algoritmo.

Se parte de una conjetura: los períodos de la mayoría de las Cefeidas del tipo I son de pocos días. Se calcula, luego, la fase de cada dato; es decir, se determina en qué parte de su ciclo se encontraba la Cefeida en cada momento en que fue observada. Si no se hace así, fácilmente emplearemos un período erróneo, sobre todo si se hicieron pocas observaciones.

Para determinar la fase se cuenta el número de ciclos completos N, comenzando desde la primera observación. Matemáticamente, N = parte entera de $(t - t_0)/p$, donde t_0 es el momento de la primera observación (en días julianos); t es el momento de una observación posterior; y p es el período de tanteo conjeturado. La parte decimal que queda es la fase; o sea,

$$\phi_t = [(t - t_0)/p] - N$$

donde ϕ_t es la fase en el momento t.

Una vez conocida la fase de cada dato, se calcula la dispersión de éstos; en otras palabras, se calcula la desviación típica de los datos. La fase (que puede valer entre 0 y 1 ciclo) se divide en intervalos de, por ejemplo, décimas y se observa cuántos datos caen en cada intervalo. Por ejemplo, podría haber tres datos cuyas fases caigan en el intervalo de 0,1 a 0,2. Se calcula su desviación típica. Esta operación se realiza para cada intervalo y luego se halla la desviación típica media de los diez intervalos.

A continuación habrá que incrementar el período y repetir los cálculos de fases y dispersiones. Debemos proceder con cuidado; si el incremento es excesivo, podríamos saltar por encima del período correcto sin advertirlo. Por otra parte, si se toman incrementos demasiado pequeños, tardaríamos mucho en llegar al valor correcto.

Tras cubrir el período completo, se examinan los valores de la desviación típica y se localiza el mínimo de éstos. En torno a ese valor mínimo se fija un pequeño intervalo y se busca un período más exacto empleando un incremento menor. El autor acostumbra emplear 0,01 días como primer incremento, disminuyéndolo en 0,1 a cada iteración. Se llega al final cuando el parámetro de dispersión resulta igual para varios valores sucesivos del período. Como valor óptimo del período se toma el valor central.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Escultura conceptual: un teorema reciente caracteriza los triángulos inscritos en el reticulado ortogonal de n *dimensiones*

El correo matinal me trajo una carta remitida por una entidad autodenominada *Centro de Escultura Conceptual*; en lenguaje no poco rebuscado me explicaba que el Centro, todavía en construcción, estaba sufriendo problemas de puesta en marcha. ¿Podría ayudarles a poner orden en la situación? El director era un hombretón de aspecto afable, que se hacía llamar Willi d'Orange. Se puso enseguida a explicarme un esotérico problema que entorpecía los trabajos de construcción; no entendiéndole, hube de pararle. "Disculpe usted, d'Orange, pero me parece que será mejor empezar por el principio. ¿En qué consiste exactamente una escultura conceptual?"

"¡Ah, lo siento! Le mostraré primero las instalaciones, para que pueda hacerse idea de la finalidad de este edificio." Me condujo por una serie de corredores y llegamos hasta una puerta rotulada con un enorme 1, pero no entramos. "En ésta no", dijo para sí. "Es demasiado trivial. Creo que se hará una idea mucho más clara si empezamos por las salas 2 y 3."

Entramos en la sala 2. La estancia hallábase atiborrada de grandes paneles blancos, divididos en cuadrículas mediante finas líneas negras en las que se habían pintado gruesos lunares de color. Veíanse paneles yacentes en el suelo; otros, clavados a las paredes o adheridos al techo; no faltaban los apoyados a modo de castillo de naipes. Dediqué mi atención al más cercano. Había en él cuatro gruesos puntos rojos ubicados en los vértices de una de las cuadrículas. La leyenda decía "(*Cuadrado 1*), Alexander Tripe, 1973". Veíase a continuación otro panel con cuatro puntos que definían un cuadrado de tamaño doble: "(*Cuadrado 2*), Alexander Tripe, 1973". Avancé por la sala hasta llegar al "(*Cuadrado 22*), Alexander Tripe, 1973". Después había un gran lienzo de pared en blanco.

"Veo que se siente usted interesado por nuestra colección Tripe", dijo d'Orange. "Tenemos la mayor de Europa. Desdichadamente, el precio de cada pieza es doble de la anterior y nuestros fondos resultaron insuficientes para adquirir el '(*Cuadrado 23*)'. Se lo quedó un magnate de la electrónica japonés."

"Una verdadera lástima", me condolí. "¿Y solamente tienen Tripes?"

"¡Oh, no! También tenemos muchísimo Morro y una cantidad suficiente de Shenanigans. Yo siento verdadera debilidad por éste. ¿Qué le parece a usted?"

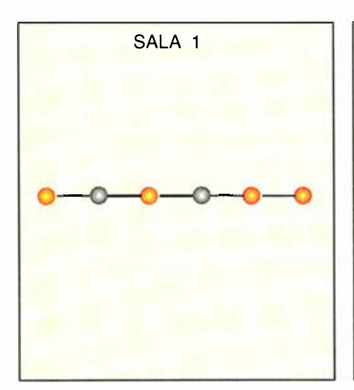
El título rezaba "(*Triángulo cuasiequilátero*), Seamus Shenanigan, 1988". La pieza consistía en tres puntos gruesos, situados a distancias aproximadamente iguales en intersecciones de las finas líneas de las cuadrículas.

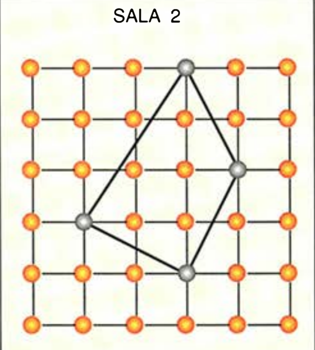
La sala 3 hallábase, lo mismo que la 2, repleta de rejillas; pero éstas, en lugar de líneas sobre paneles blancos, consistían ahora en finas varillas de metal, pintadas de negro. Las varillas definían un retículo cúbico, algo así como las celdillas de un tablero de ajedrez tridimensional. En las intersecciones de algunas de las líneas del retículo habíanse fijado bolas rojas. No tardamos en descubrir el "*Triángulo equilátero*" de Shenanigan.

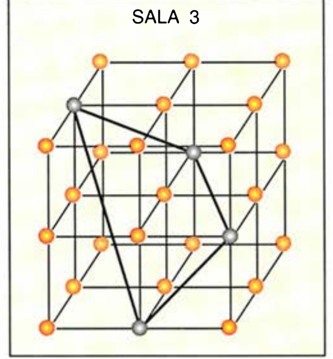
"Fue preciso instalarlo en la sala 3", explicó el director. "Édouard Lucas demostró en 1878 que no es posible tener un triángulo equilátero en la sala 2. Lo cual resulta francamente raro, habida cuenta de que en la sala 3 sí podemos tener un tetraedro regular." Me llevó hasta "*Tetraedro*, por Thomas Rot, 1982". "También tenemos una abundante colección de Tommy Rot", añadió el director, no poco ufano.

La sala 4 parecía una fábrica de reciclado de papel. Había hojas de papel apiladas por toda ella. "De la sala 4 en adelante todo es muy conceptual", dijo el director en tono casi de disculpa. Tomé una hoja. Estaba cubierta de números agrupados en cuartetos, como (1, 0, –1, 2) o más ambiciosamente, (243, –9975, 42, 100000001).

"¡Poliedros reticulares!", grité casi. "¡Las esculturas conceptuales no son más que poliedros reticulares! ¡Y el número de la sala corresponde a la dimensión del retículo!"



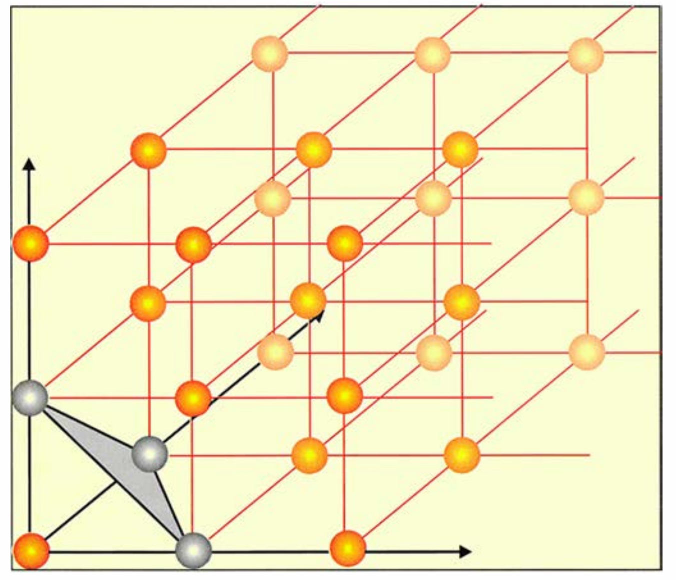




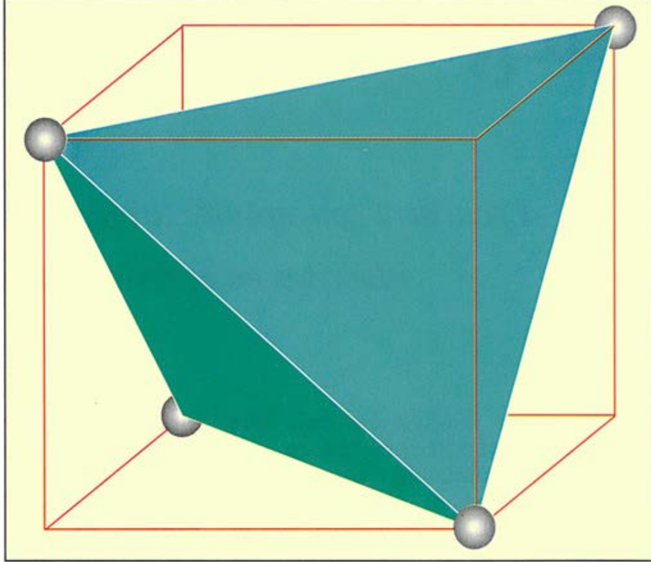
SALA 4

(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,1) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,0) ;	(0,0,0,1) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,1) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,0) ;	**(0,0,0,0) ;**	**(0,0,0,0) ;**	**(0,0,0,1)**
(0,0,0,2) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,1) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,1) ;	(0,0,1,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,0) ;	**(0,0,0,1) ;**	**(0,0,3,0) ;**	**(0,0,0,0)**
(0,1,0,0) ;	(0,0,1,0) ;	(0,0,0,1) ;	(0,0,0,0)
(1,0,0,0) ;	(2,0,0,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,1)
(0,0,4,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,2,0,1) ;	(0,0,3,0) ;	(0,2,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,0,0,0) ;	(0,6,0,1) ;	(0,0,0,0) ;	(0,0,0,0)
(0,0,1,0) ;	**(0,0,8,0) ;**	**(0,2,0,1) ;**	**(0,4,4,0)**
(0,0,2,0) ;	(0,1,0,0) ;	(2,2,0,2) ;	(0,4,0,1)

1. Prototipos de motivos pertenecientes a las diferentes salas.



2. Triángulo equilátero de Shenanigan.



3. Tetraedro de Thomas Rot.

El director hizo un gesto de asentimiento. "Ya ve usted por qué tenemos que ser tan conceptuales a partir de la sala 4."

"Evidentemente. Un retículo n-dimensional puede ser concebido como el conjunto de todas las series ordenadas de n números enteros, positivos o negativos. Los poliedros reticulares tienen sus vértices en los nodos del retículo. Y claro, sólo cabe construir modelos materiales en dimensiones dos y tres; de ahí sus salas 2 y 3.

"También son posibles en la sala 1, la verdad", añadió. "Pero no es una sala muy interesante, salvo que le guste la escultura minimalista. La escultura conceptual fue idea de Alexander Tripe, allá por el decenio de 1960. Pretendía crear esculturas tetradimensionales, pero tropezó con dificultades para conseguir los materiales necesarios. Durante algún tiempo produjo secuencias de esculturas tridimensionales que variaban sistemáticamente de una a la siguiente, algo así como la representación de una película de cine mediante una serie de fotogramas estáticos. Pero esa solución no le satisfizo. Dio entonces con la idea de representar la escultura en abstracto, presentándola como un conjunto de coordenadas. A causa de la inexactitud intrínseca de los números con decimales, limitó las coordenadas a valores enteros. Tenemos aquí la pieza culminante de nuestra colección, su primera escultura conceptual en cuatro dimensiones."

Me mostró un cuadrado de corcho sujeto a la pared, encerrado todo ello en una urna de cristal grueso. Nada menos que cinco cámaras de vigilancia convergían en él. En el interior de la urna, un instrumento registraba la temperatura y la humedad. Un trozo de papel burdamente arrancado del margen de una revista estaba sujeto al corcho con una chincheta. En el papel, más que escrito, estaba garrapateado: (1,0,0,0) (0,1,0,0) (0,0,1,0) (0,0,0,1).

El rótulo decía "Tetraedro en el espacio de cuatro dimensiones, Alexander Tripe, 1967". "Una obra maestra," suspiró conmovido Willi d'Orange. Pasamos a su despacho, que estaba anexo a un precioso ático, amueblado y decorado con gusto y lujo. Se percató de mis miradas a las manecillas de las puertas, chapadas en oro. "El arte excelso se merece sólo lo mejor", explicó.

Ante mi decidido "Veamos el problema, si le parece", lanzó en mi dirección algo plano y duro. Lo atrapé por puro reflejo. Era un pentágono.

"¿Qué pasa con él?", pregunté.

"¿A qué sala debemos adscribirlo?"

"Se trata de un pentágono regular, ¿me equivoco? ¿Son todos los lados y todos los ángulos exactamente iguales?"

"Así es, en efecto."

"Y usted desea saber la mínima dimensión de un retículo que contenga cinco nodos que definan un pentágono regular."

"Cabalmente. Sabemos ubicar un cuadrado en la sala 2 y podemos situar triángulos equiláteros y hexágonos regulares en la sala 3. Pero nuestro conocimiento acaba aquí." [*Pregunta 1: Vea el lector de situar un hexágono en la sala 3.*]

"Se trata de una restricción cristalográfica", dije.

"Disculpe, ¿qué ha dicho?"

"Los átomos de los cristales definen retículos regulares. Las simetrías de rotación de los cristales corresponden a polígonos regulares inscritos en tales retículos. Los cristalógrafos Haüy y Barlow demostraron que ningún cristal tiene ejes de simetría quíntuple; más todavía, que las únicas simetrías de rotación son de multiplicidad n = 1, 2, 3, 4 y 6. Su demostración concernía a retículos tridimensionales, pero métodos muy similares al suyo funcionan en cualquier número de dimensiones. En 1937, Isaac Schoenberg demostró que los polígonos regulares inscriptibles en un retículo, cualquiera que sea la dimensión de éste, han de tener necesariamente 1, 2, 3, 4 o 6 lados. Los casos n = 1 y n = 2 no son convencionalmente asociados con polígonos; en este caso, habría que entender que el 'monolátero' es un punto y el 'bilátero' un segmento rectilíneo."

"¿Me está diciendo usted que es imposible?"

"Así es."

"¡Pero eso es catastrófico! ¿Las esculturas conceptuales no pueden ser pentagonales? ¿Y cómo voy a conseguir ahora el patrocinio de los militares? ¡A los americanos no les va a hacer ninguna gracia!"

"Lo lamento, pero así son las cosas."

"Será preciso que me convenza usted", dijo en tono desafiante.

"Existe una demostración preciosa de 1946, debida a W. Scherrer. Supongamos que en el retículo exista un polígono regular de n lados. Supongamos, para empezar, n = 6. Fi-

jémonos en los vectores del retículo formados por los n lados del polígono. Trasladémoslos, haciéndolos partir a todos del origen. Las puntas de las flechas forman entonces un polígono reticular de n lados, pero más pequeño. Repitiendo el proceso indefinidamente se obtiene una sucesión decreciente infinita de polígonos reticulares de n-lados. Pero esto es absurdo, porque la distancia mínima entre puntos del retículo es perfectamente fija y definida."

"¡Pero su análisis no cubre el caso del pentágono!"

"El caso $n = 5$ requiere un poco más de sagacidad. Numeremos los lados del pentágono en el orden 1, 2, 3, 4, 5. Tomándolos en el orden 1, 3, 5, 2, 4, vayamos colocando el origen de cada uno a continuación del extremo del precedente. Se obtiene así una estrella de cinco puntas, cuyos vértices definen en el retículo un pentágono regular más pequeño que el original. Se deduce la misma contradicción que en el caso anterior."

Hundió la cabeza entre las manos. "No se agobie", dije yo para animarle. "La estrella de David es un polígono reticular. [*Pregunta 2: ¿Podrá el lector demostrarlo?*] Sin duda logrará fondos de los servicios de inteligencia israelíes." Un esbozo de sonrisa le alegró el rostro.

"En realidad", proseguí, "el artículo de Schoenberg de 1937 no se ocupaba de polígonos, sino de símplices. Un símplice 2-dimensional es un triángulo equilátero; el símplice 3-dimensional es un tetraedro regular; en general, un símplice n-dimensional consta de $n + 1$ puntos equidistantes dos a dos en el espacio de n dimensiones. Es fácil ver que todo n-símplice puede ser alojado en un retículo $n + 1$ dimensional, de forma muy similar al '*Tetraedro en el espacio de cuatro dimensiones*' de Alexander Tripe. Schoenberg se preguntó en qué casos es posible inscribir un símplice n-dimensional en un espacio n-dimensional, esto es, de una dimensión menos. Es imposible alojar el triángulo equilátero en un retículo planar (explicaré por qué dentro de un momento), pero el tetraedro *sí* puede ser alojado en un retículo 3-dimensional, como el *Tetraedro* de Rot pone de manifiesto."

"Schoenberg demostró que la respuesta es en extremo curiosa. Por ejemplo, para valores de $n \leq 25$, el n-símplice es inscriptible en un retículo n-dimensional si y solamente si n = 1, 3, 7, 8, 9, 11, 15, 17, 19, 23, 24, 25. [*Pregunta 3: ¿Se aprecia alguna regularidad?*]

Willi d'Orange movió pasmado la cabeza. "Ya veo que la asignación de sala a un poliedro dado es asunto delicado", dijo. Buscó por la estancia y encontró una gran caja de cartón. "Así pues, ¿qué he de hacer con ellos?" Sacó un triángulo. La caja estaba repleta de triángulos de todas las formas concebibles. "Teníamos que colocarlos en un ala nueva del edificio, para la que en este momento estamos buscando donativos, las Galerías del Triángulo. ¿Pero dónde?"

Me pasó uno de ellos. Portaba el rótulo "triángulo isósceles de altura $\sqrt{7}$ y base 2".

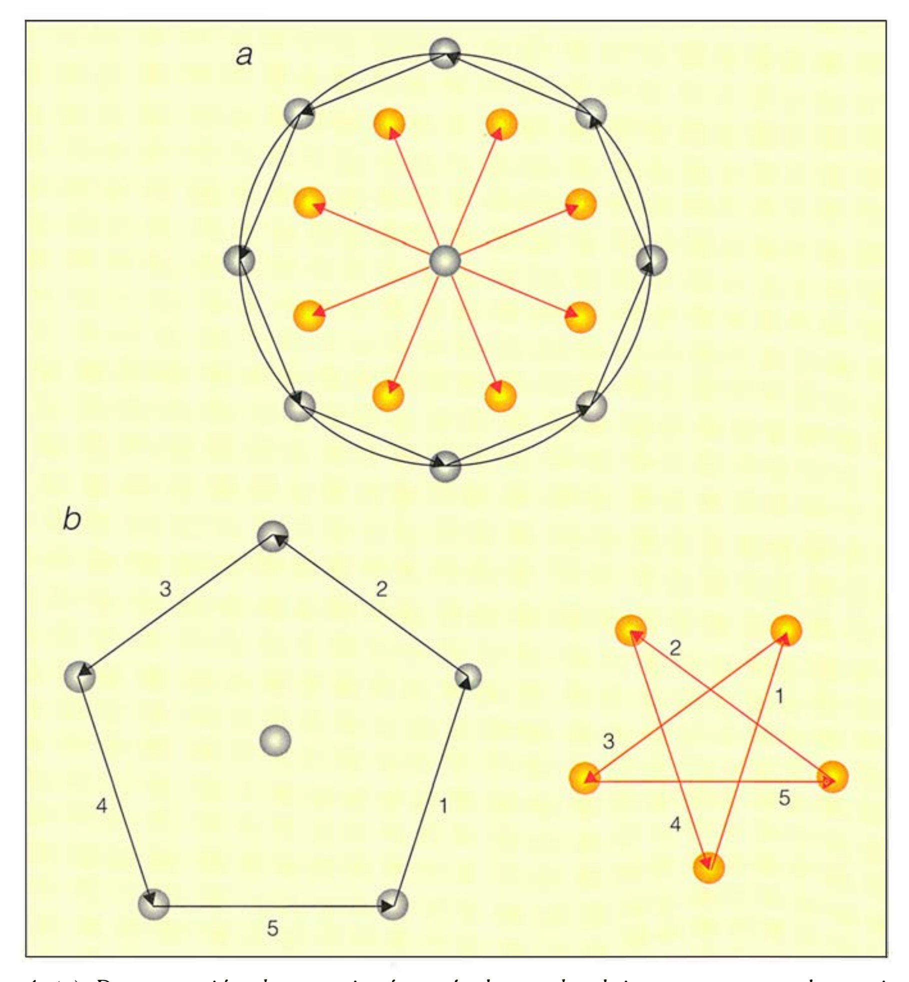
"O sea, que desea usted tres puntos del retículo que definan un triángulo de esta forma y tamaño?"

"La forma es lo que importa; el tamaño es irrelevante."

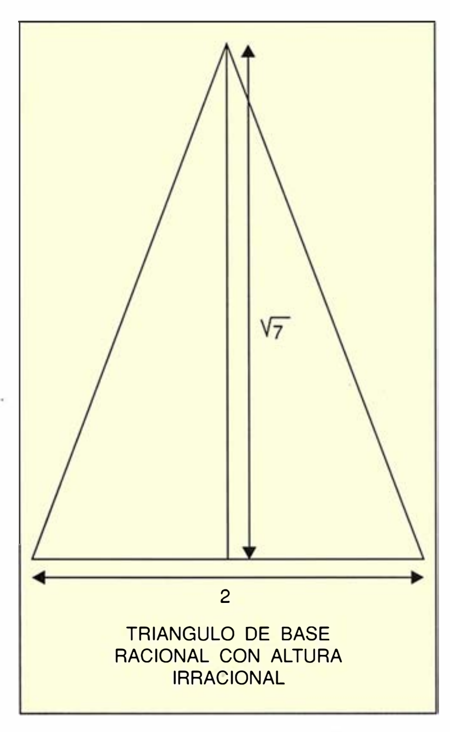
"Ah. Lo que usted quiere es un triángulo semejante, cuyos vértices sean nodos del retículo. Y desea saber cuál ha de ser la dimensión necesaria". Reflexioné un instante. "Denominemos *triángulo* n-*reticular* al que sea semejante a un triángulo cuyos vértices son nodos de cierto retículo n-dimensional. Lo que se necesita es una caracterización de los triángulos n-reticulares, para cada valor de n. Vamos a ver... Bueno, para empezar, todo triángulo n-reticular es también m-reticular si $m \geq n$; lo que importa, pues, es el mínimo valor de n. Y como ahora estamos hablando de triángulos semejantes, sólo hemos de fijarnos en los ángulos. Pensemos en retículos en el plano... triángulos 2-reticulares. ¡Ah, ya veo! Lo que cuenta es la tangente del ángulo."

Willi D'Orange daba signos de perplejidad. "Sabía que las curvas tienen tangentes, ¿pero los ángulos...?"

"Tangentes trigonométricas. La tangente de un ángulo es la relación entre el cateto opuesto y el contiguo a ese ángulo cuando éste forma parte de un triángulo rectángulo. En el caso de que los vértices del triángu-



4. (a) *Demostración de que ningún retículo puede alojar* n*-gonos regulares si* $n \geq 7$*. De ser posible, al trasladar los lados al centro se engendraría un polígono reticular más pequeño, también de* n *lados.* (b) *Demostración de que ningún retículo puede contener pentágonos regulares: por traslación de los lados se engendraría una estrella cuyos vértices definirían un pentágono reticular menor.*



5. ¿Cuál es la dimensión mínima del retículo capaz de alojar a un triángulo semejante al de la figura?

lo rectángulo sean nodos del retículo, la tangente habrá de ser un número racional, o sea, la razón o cociente de dos números enteros. Pues los lados del triángulo rectángulo son números enteros."

Proseguí. "Evidentemente, el triángulo pudiera estar al bies. Pero en tal caso, cada ángulo puede ser dividido en dos que posean tangentes racionales. Ahora bien, tenemos las fórmulas:

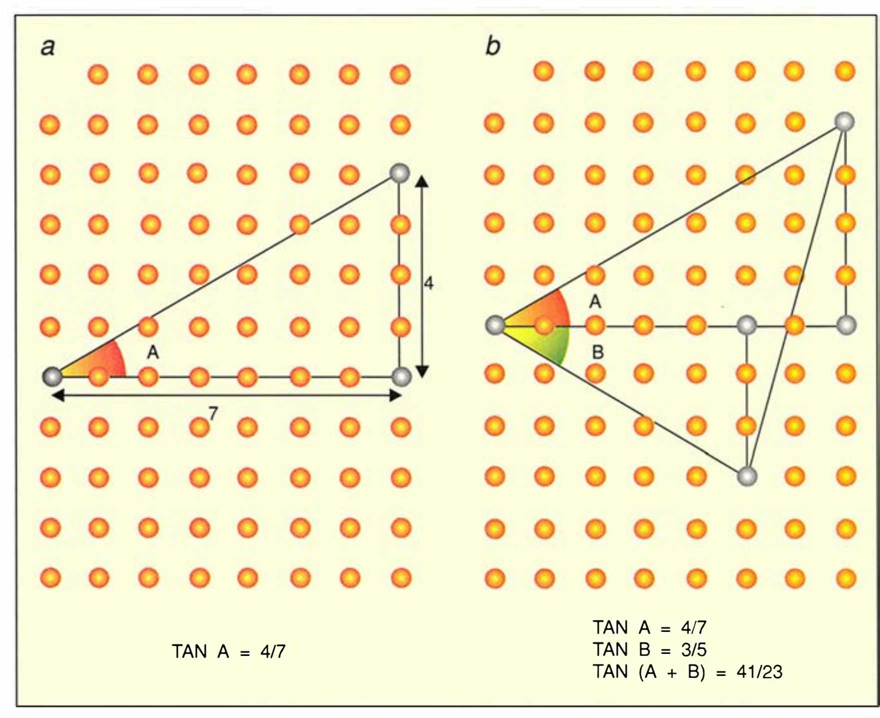
$\tan(A + B) = (\tan A + \tan B)/(1 - \tan A \tan B)$,

$\tan(A - B) = (\tan A - \tan B)/(1 + \tan A \tan B)$,

Por lo tanto si $\tan A$ y $\tan B$ son números racionales, también lo son $\tan(A + B)$ y $\tan(A - B)$. Ergo, cada lado de un triángulo 2-reticular ha de tener tangente racional."

John McCarthy ha demostrado recientemente que la recíproca es también cierta. La demostración consiste en trazar una perpendicular que produzca dos triángulos rectángulos y reproducir el argumento retrógradamente. En breve, los triángulos 2-reticulares son precisamente aquellos cuyos ángulos tienen tangentes racionales.

La mirada perpleja de Willi me animó a continuar. "Por ejemplo, los ángulos del triángulo equilátero miden 60°. Puesto que $\tan 60° = \sqrt{3}$, que es un número irracional, el triángulo equilátero no es triángulo 2-reticular. Por otra parte, sí lo es 3-reticular, como descubrió Shenanigan. Y este triángulo" —agité en el aire el triángulo que había sacado de la caja, el triángulo isósceles de base 2 y altura $\sqrt{7}$— "tiene en su base ángulos de tangente $\sqrt{7}$, también irracionales, por lo que tampoco es un triángulo 2-reticular."



6. (a) *El ángulo* A *posee tangente racional.* (b) *El ángulo* B *también; lo mismo vale para* A + B, *pues* $\tan(A + B) = (\tan A + \tan B)/(1 - \tan A \tan B) = (4/7 + 3/5)/(1 - 4/7 \times 3/5) = 41/23$.

Willi d'Orange ofreció una apagada sonrisa. "La verdad es que necesito saber bastante más que eso. Necesito saber cuál es la dimensión exacta adecuada para cada triángulo dado."

"Lo sé. Espere un momento, me estoy acordando ahora. Michael Beeson, de la Universidad estatal de San José, resolvió completamente el problema hace apenas unos meses. Obtuvo soluciones muy extrañas. Aunque los posibles valores de la dimensión n del retículo son infinitos, la verdad es que solamente existen tres casos distintos: 2 dimensiones, 3 o 4 dimensiones, y 5 o más dimensiones.

- ($n = 2$) Los triángulos 2-reticulares son precisamente aquellos cuyos ángulos tienen tangentes racionales.
- ($n \geq 5$) Los triángulos 5-reticulares son aquellos en los que los *cuadrados* de las tangentes de sus ángulos son todos racionales; lo mismo vale para todo valor de n más elevado.
- ($n = 3$ o $n = 4$) Un triángulo es 3-reticular si y solamente si las tangentes de sus ángulos son todas múltiplos racionales de $\sqrt{k}$, siendo k la suma de los cuadrados de tres números enteros.

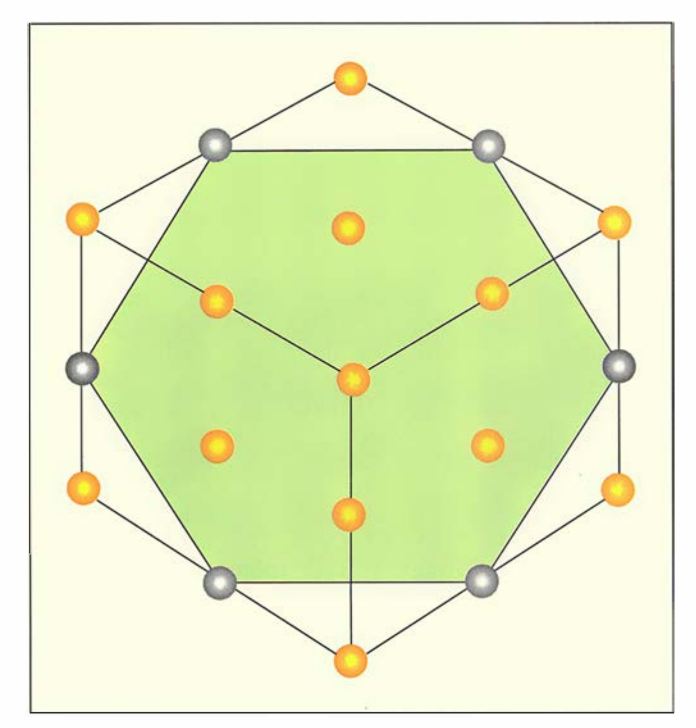
La misma condición vale para triángulos 4-reticulares.

Beeson descubrió sus resultados empíricamente, trabajando con ordenador, y se las arregló luego para demostrarlos valiéndose de teoría de números. La propiedad de que todos los triángulos reticulares puedan ser inscritos en un retículo 5-dimensional es consecuencia de un teorema que establece que todo número entero es suma de cuatro cuadrados perfectos. El número k que aparece en los casos $n = 3$ o $n = 4$ está relacionado con el área del triángulo."

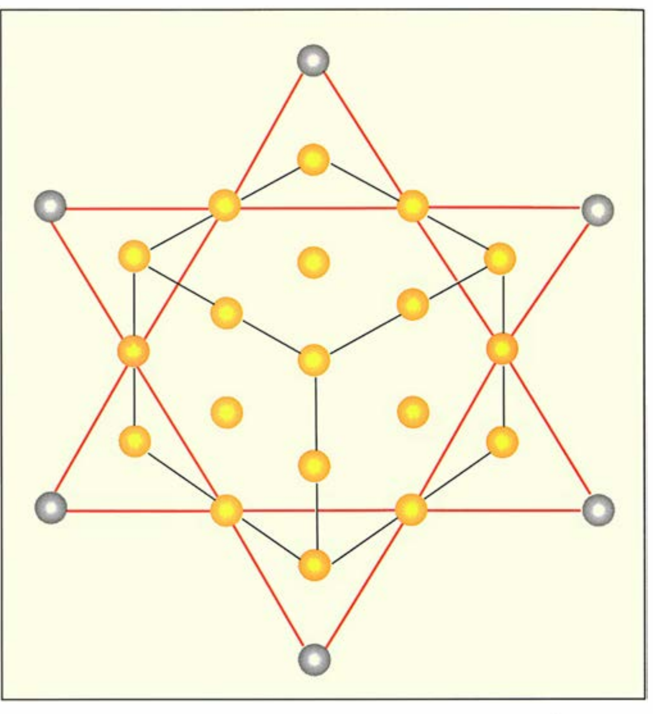
Willi d'Orange parecía desconcertado. "Repítame eso, por favor."

"Todo depende de las tangentes de los ángulos; sólo caben tres casos. Aquellos triángulos susceptibles de quedar inscritos en un retículo n-dimensional, para cierto valor de n, necesariamente serán inscriptibles en un retículo 5-dimensional. Existen triángulos 5-reticulares que no son 4-reticulares; en cambio, todo triángulo 4-reticular es necesariamente 3-reticular. Finalmente, existen triángulos 3-reticulares que no son 2-reticulares. Y calculando las tangentes de los ángulos, más un poco de teoría de números, se puede decidir de qué caso se trata."

"Por ejemplo, las tangentes de los ángulos de su triángulo isósceles son



7. Un hexágono inscrito en un retículo tridimensional. Se toman los puntos medios adecuados en un retículo de tamaño doble.



8. Una estrella de David en un retículo tridimensional. Basta prolongar los lados del hexágono de la figura 7; las prolongaciones se cortan dos a dos.

todas ellas múltiplos racionales de $\sqrt{7}$. Por tanto, los cuadrados de las tangentes son racionales y necesariamente habrá de ser un triángulo 5-reticular. Sin embargo, como 7 no es suma de cuadrados, tal triángulo isósceles no es triángulo 4-reticular. Debe ser asignado a la sala 5, señor director." [*Pregunta 4: ¿Podrá el lector hallar tres puntos en el retículo 5-dimensional que definan tal triángulo?*]

Willi d'Orange se puso en pie de un salto y me estrechó la mano calurosamente. "¡Le felicito! Mis problemas dan fin, y la construcción de las Galerías del Triángulo puede terminar en la sala 5!"

"No me felicite a mí", le respondí. "Fue Michael Beeson quien hizo todo el trabajo. ¿Se ha dado cuenta de que en lo tocante a triángulos las salas 3 y 4 son indistinguibles? Podría usar la misma sala, poniéndole dos puertas con distinto rótulo."

"¡Sí! ¡Ahorraremos millones!" Le echó una ojeada a su caja de cartón llena de triángulos. "¡Podré encontrar sitio en las Galerías del Triángulo para todos y cada uno!"

"¡Ejem..! ¡Señor director...!"

"Sí, ¿qué pasa?"

"¿Ha dicho usted que en esa caja están todos los triángulos imaginables?"

"Desde luego. Vea, aquí está el que nos dio Arquímedes, el que utilizó en su demostración del área del círculo. Es un triángulo rectángulo de altura 1 y base (2π). ¡Será orgullo y alegría de las Galerías del Triángulo!"

Emití una tosecilla, abochornado. "Lo lamento, pero no podrá ser así."

"Pero..., ¿por qué no?"

"Tiene un ángulo cuya tangente, al cuadrado, es ($4\pi^2$). Y ese número es irracional. El triángulo de Arquímedes no es triángulo n-reticular para ningún valor de n. Lo que el teorema de Beeson dice es que, si un triángulo es reticular, entonces es triángulo 5-reticular. Pero no dice que todos los triángulos hayan de ser triángulos n-reticulares para algún valor de n."

El director d'Orange permaneció unos segundos mirando torvamente al triángulo de Arquímedes. Entonces... "¡Bueno, pues ya está!", dijo, arrojándolo a la papelera. "Nadie va a echar en falta este triangulito."

"Sí, pero lo malo es que no es el único", dije. "La verdad es que son muchísimos los triángulos cuyos ángulos tienen tangentes cuyo cuadrado es irracional."

"¿Cuántos?", preguntó con aire preocupado.

"Casi todos", respondí.

Soluciones:

1. Vemos en la figura 7 un hexágono incriptible en el retículo tridimensional.

2. En la figura 8 se muestra una estrella de David en el retículo tridimensional.

3. Schoenberg demostró que la condición necesaria y suficiente para que un n-símplice sea incriptible en un retículo n-dimensional es que n se encuentre en uno de los casos siguientes:

- n es par y $n + 1$ es cuadrado perfecto.
- n es de la forma $4m + 3$, para todo valor de n.
- n es de la forma $4m + 1$, y $n + 1$ es suma de dos cuadrados perfectos.

4. Es necesario tomar $n \geq 5$. En el caso $n = 5$, los puntos (1, 0, 0, 0, 0), (–1, 0, 0, 0, 0) y (0, 1, 1, 1, 2) forman uno de tales triángulos.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

THEORÈME SUR LA GÉOMETRIE DES QUINCONCES. E. Lucas, en *Bulletin de la Société Mathématique de France*, n.º 6, págs. 9-10, 1878.

REGULAR SIMPLICES AND QUADRATIC FORMS. I. J. Schoenberg, en *Journal of the London Mathematical Society*, n.º 12, págs. 48-55, 1937.

DIE EINLAGERUNG EINES REGULÄREN VIELECKS IN EIN GITTER. W. Scherrer, en *Elemente der Mathematik*, n.º 1, págs. 97-98, 1946.

TRIANGLES WITH VERTICES ON LATTICE POINTS. Michael J. Beeson, en *American Mathematical Monthly*, n.º 99 , páginas 243-252, 1992.

Libros

Domingo Fletcher, Laureano Carbonell y Luis Alonso

España etrusca

¿Comercio u ocupación?

LA PRESENCIA DEL MATERIAL ETRUSCO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA. Universidad de Barcelona; Barcelona, 1991.

La hipótesis de una colonización etrusca en la Península Ibérica postulada por Schulten en 1930 reanimó lo que en otros tiempos había sido tan sólo una episódica sugerencia, pero las objeciones que le hicieran Bertoldi y Battisti enfriaron los entusiasmos en cuanto a la lengua, mas no así al aspecto arqueológico, por lo que hubo investigadores que prestaron especial atención a cuantos materiales hallados en nuestros yacimientos pudieran probar una procedencia etrusca, admitiendo su llegada por comercio pero nunca por ocupación territorial. Nosotros mismos, señalábamos en 1949 algunos posibles paralelos. Pasados algunos años menguaron las atribuciones etruscas hasta llegar, en el caso de Almagro Basch, a negar tanto el comercio como la colonización, lo que no fue obstáculo para que Blanco Freijeiro admitiese en 1956 el influjo etrusco, lo mismo que hiciera en 1968 Blázquez, seguido de otros estudiosos.

En la actualidad disponemos de más elementos de juicio y de una nueva generación de arqueólogos que han vuelto sobre la cuestión etrusca, cristalizando en la convocatoria de una Mesa Redonda, celebrada en Barcelona en 1990, cuyas aportaciones se recogen aquí.

Remesal plantea el tipo de las relaciones ibero-etruscas, asunto en el que insiste Barceló. Sobre el papel que desempeña la aristocracia en la Etruria arcaica, versa la comunicación de Martínez Pinna; la de Camporeale incide en el tema del comercio arcaico, pero ninguna de ambas hace referencia a las relaciones ibero-etruscas, que sí se abordan en la exposición de Montero Herrero con el estudio de la religión y lengua etruscas en España. Romualdi se ocupa de la Populonia en época helenística y volvemos al tema base con el estudio que, sobre la presencia comercial etrusca en la Emporion arcaica, firman E. Sanmartí, P. Castanyer, Tremoleda y M. Santos.

Hallazgos etruscos en yacimientos en el NE de Cataluña son citados por Martín Ortega y de las influencias etruscas en los ajuares funerarios ibéricos habla Munilla. De los hallazgos etruscos en el poblado de La Moleta de Alcanar y su relación con los de otros lugares, escribe Gracia Alonso. Kurtz señala las influencias en el armamento ibérico, con especial mención a la falcata.

Los primeros contactos mediterráneos con la zona N de la región valenciana se exponen por Oliver Foix y Gusi Jener, para quienes la costa castellonense fue puerta de entrada de los pioneros fenicios y, a partir del s. VII, de los comerciantes griegos. A los siglos VII-VI a. C. se refiere el estudio de Dirce Marzoli sobre las importaciones etruscas de jarritas de bronce y de las cerámicas etrusco-corintias de Ampurias, Asensi, señalando paralelos extrapeninsulares. Domínguez Monedero estudia la repercusión de la batalla de Alalia en el comercio etrusco con España, el cual queda definitivamente desbancado después de Cumas, pasando a manos emporitanas, por lo que se hace difícil admitir relaciones directas entre Etruria e Iberia más allá del primer cuarto del s. VI a. C.; todo lo posterior ha de atribuirse al comercio helénico. Sobre actividades comerciales fenicias y griegas en Cataluña, en época arcaica, versa el estudio de Alaminos, Ojuel, J. Sanmartí y Stancana, y referente a piezas etruscas de Ibiza y reflexión sobre rutas de llegada de objetos etruscos a la península, es la comunicación de Gómez Bellard.

Llobregat Conesa, al cotejar templos y tumbas de Etruria e Iberia, opina que ambas culturas evolucionan independiente pero paralelamente en el período helenizante, con un mismo modelo cultural y artístico que alcanza desde los confines del Asia Anterior hasta nuestra península, es decir, una koiné, de la que podemos mencionar un precedente, con el substrato lingüístico del Mediterráneo, anterior a la llegada indoeuropea a nuestro mar.

Referencias concretas a materiales etruscos hallados en España son los artículos de Lucas Pellicer, sobre una bandeja metálica de la Peña del Negro (Crevillente) y sus paralelos, cronología y posible ruta de llegada; el de García Cano, relacionando el comercio arcaico en Murcia con otros materiales etruscos; el de Casadevall, Curiá, Delgado, Fieber, Párraga y Ruiz sobre el bucchero de Guadalhorce y la problemática de este tipo cerámico; el de Corzo, estudiando piezas procedentes de Sanlúcar de Barrameda, y el de Fernández Jurado, de cerámicas de la misma región andaluza.

De Extremadura son los hallazgos que da a conocer Celestino Pérez y los bronces orientalizantes, que describe e interpreta García-Hoz.

De más amplio contenido es la comunicación de Quesada Sanz, que vuelve sobre el origen mediterráneo oriental de la falcata y su ruta de llegada a la península, tal vez por intermedio etrusco. A su vez, Coghland compara la falcata de Vetulonia con otra de Almedinilla, considerándolas del mismo tipo, pero de características metalúrgicas diferentes.

De la presencia ibérica en tierras itálicas es el estudio de S. Bruni y M. J. Conde, con extensa relación de cerámicas de los s. III al I a. C., principalmente de "sombreros de copa" a los que suponen de origen ampuritano; tal vez, si hubiesen buscado más paralelos no habrían llegado a la conclusión de que tales cerámicas se destinaban a usos funerarios y comprobado que podían proceder de más lugares que el supuesto por los autores. De Ullastret es un oenochoe, datado por Donati en el primer cuarto del s. VI a. C.

Pallarés Comas relaciona las escenas mitológicas de la pátera de Tivissa, que data de mediados del s. IV, con el mundo etrusco, pero no hace mención de la inscripción ibérica de la pátera, que muy posiblemente tuviera que ver con las escenas de la vasija. Blázquez estudia, en su comunicación, la posibilidad de que artesanos etruscos hubieran trabajado en Tartesos, al igual que hicieran artesanos fenicios y griegos.

Tres comunicaciones versan sobre

objetos de bronce; la de Izquierdo y Solías referente a dos cascos de tipología etrusca, procedentes del Bajo Llobregat; la de Fernández Gómez, sobre pequeña figura femenina, de hacia el 500 a. C. que prueba influjos orientales en la Meseta, y la de García Alonso y M. Domingo, considerando etruscas un hacha y dos puntas de lanza. La última comunicación la firma Gran-Aymerich, con visión de conjunto de los temas tratados en la M. R., acompañando larga lista de bibliografía.

La escasez de espacio nos ha forzado a dar sucinta noticia de las 34 comunicaciones, todas del mayor interés por contenido y abundante bibliografía. Destacamos también la cuidada parte gráfica con 174 páginas de dibujos, fotografías, cuadros estadísticos y mapas. (D. F.)

Mediterráneo

Disputa de siglos

GEOGRAPHY, TECHNOLOGY, AND WAR. STUDIES IN THE MARITIME HISTORY OF THE MEDITERRANEAN 649-1571, por John H. Pryor. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

Geography, technology, and war es el resultado de una doble afición, el comercio mediterráneo y las cruzadas. El título revela su propósito, o tesis según la cual el medio (definido por la geografía, junto con la meteorología y oceanografía), la ciencia (tecnología naval, cuyo dominio y aprovechamiento de los elementos era muy parcial) y la situación política (variable en cada momento) condicionaron la vida en las riberas mediterráneas.

Desde la perspectiva del interés para la navegación, analiza los vientos, cuyo régimen no presenta la regularidad ni la periodicidad característica de los que soplan en los océanos, y las corrientes principales. Da un repaso también a la tipología de las naves existentes y su evolución en el período considerado, comparando las ventajas y limitaciones de los dos tipos principales: las galeras y las naves de alto bordo. Delimita las principales rutas seguidas por los navegantes.

Los musulmanes ejercieron el dominio territorial y marítimo del Mediterráneo entre los siglos VIII y mediados del X, en que empezó su decadencia, cuando los bizantinos recuperaron Creta y Chipre. Poco después dieron comienzo las cruzadas, cuya faceta naval explica recordando las actuaciones de la flota egipcia, la principal oponente, y reflejando sus limitaciones, a causa de la falta de bases en las zonas a cubrir y que reducían mucho su capacidad ofensiva.

Las cruzadas marcan el inicio de una nueva época, con la ofensiva de Occidente contra el Islam, sustituyendo en este empeño a Bizancio, que, en 1204, se convertirá en víctima inesperada. Esa época coincide con el despegue de las técnicas de navegación, al difundirse el compás o aguja náutica —la brújula—.

Desconfía el autor de las afirmaciones relativas a la desaparición absoluta en el ejercicio del comercio marítimo de las naves contrarias a quien ostentaba la talasocracia del Mediterráneo en cada momento, al mismo tiempo que revela la existencia de un corso extendido por todo el mar.

Tras la caída de Constantinopla en 1453, las galeras sutiles venecianas eran muy superiores a las kadirgas de los turcos, por cuyo motivo éstos procuraban no entrar en combate a menos de contar con una superioridad de cuatro o cinco a uno a su favor. A pesar de todo, a partir de entonces y durante algo más de un siglo, los turcos, sin necesidad de conseguir grandes victorias navales, fueron extendiendo los dominios a lugares estratégicos e implantando su autoridad en las principales rutas marítimas.

El corso, principalmente del lado musulmán, siguió predominando, según corroboran Fontenay y Tenenti, cuyas conclusiones demuestran que las incursiones de los corsarios cristianos en Levante eran sólo la décima parte de las realizadas por los musulmanes en Occidente. Este hecho se explica por el reducido número de bases cristianas existentes en aquella parte, mientras los musulmanes disponían, por concesión de Fernando I de Nápoles, en 1478, del permiso de utilización de los puertos de su reino. En la práctica, las galeras otomanas del siglo XVI seguían siendo muy pobres de construcción y de materiales de mala calidad, además de estar poco cuidadas, por todo lo cual eran menos manejables que las venecianas, aunque éstas a su vez resultaban demasiado pesadas y lentas para las pequeñas kalite o galeotas usadas por los corsarios turcos.

Pryor asocia a los orígenes corsarios a Bujía (1360) y Túnez (1390), dando como zonas más afectadas las costas de Sicilia y del mar Jonio; las del sur de Italia, hasta la bahía de Nápoles; todas las islas del Mediterráneo occidental; Génova; Provenza y la zona del Estrecho de Gibraltar. Y como lugares de apoyo y aprovisionamiento las islas de Formentera, S. Pietro, Stromboli, Lípari y Lampedusa, además de las comunidades de moriscos de Granada y Calabria. A finales del siglo XVI los corsarios berberiscos empezaron a sustituir las galeras por naves de vela. (L. C.)

Embriología

Plástica determinación

A CONCEPTUAL HISTORY OF MODERN EMBRIOLOGY. Dirigido por Scott F. Gilbert. Plenum Press; Nueva York, 1991.

EMBRYOS, GENES, AND EVOLUTION, por Rudolf A. Raff y Thomas C. Kaufman. Indiana University Press; Bloomington, 1991.

HETEROCHRONY. THE EVOLUTION OF ONTOGENY, por Michael L. McKinney y Kenneth J. McNamara. Plenum Press; Nueva York, 1991.

THE MAKING OF A FLY. THE GENETICS OF ANIMAL DESIGN, por Peter A. Lawrence. Blackwell Scientific Publications; Oxford, 1992.

La ciencia contemporánea se mueve entre dos metáforas románticas: la búsqueda del Santo Grial y la piedra de la Rosetta. Remite la primera a los retos fundamentales de cualquier disciplina, cuya resolución, se espera, habrá de cortar los nudos gordianos que la amarran y no le dejan avanzar. La piedra de la Rosetta de la biología del desarrollo, se ha dicho, porta los caracteres, ya descifrados, de la secuencia "homeobox". Trátase ésta de un segmento de ADN, de permanente estabilidad a lo largo de la evolución, que determina un dominio de 60 aminoácidos y permite conocer el desenvolvimiento de los planes corporales de los distintos *phyla*.

Pero la biología del desarrollo, pese a su importancia intrínseca, es, todavía, una ciencia ensimismada y distante, incluso para muchos naturalistas. Merece, pues, la pena echar un vistazo a la situación actual de la misma a través de unos cuantos libros representativos.

Comenzaremos por un repaso a su gestación. *A Conceptual History of Modern Embriology* se imbrica en una serie de volúmenes que compendian lo que hoy se sabe sobre la materia. Este, el séptimo de la co-



Drosophila melanogaster.

lección, abarca el desarrollo de las ideas embriológicas desde el descubrimiento del óvulo de los mamíferos hasta el ARNm antisentido; en fechas, desde el primer tercio del siglo XIX hasta nuestros días.

De los orígenes de la embriología descriptiva clásica se ocupa Frederick B. Churchill. Tras un sumario vistazo a los antecedentes remotos en Aristóteles, Fabricio de Aquapendente y William Harvey, y a los más inmediatos del XVIII (Albrecht von Haller, Lazzaro Spallanzani y Caspar F. Wolff), dedica el grueso de su colaboración a los "padres fundadores", que vivieron en la periferia báltica: Christian Pander (1794-1865), Karl Ernst von Baer (1792-1876) y Heinrich Rathke (1793-1860). Los tres estudiaron en las mismas fuentes durante sus años de formación médica. Pander y Baer compartieron incluso maestros. Bajo la influencia de uno de éstos (Ignaz Döllinger), Pander estudió el desarrollo del pollo y publicó su única obra en embriología, de sólo 42 páginas, que ejercieron una decisiva influencia: *Beiträge zur Entwickelungsgeschichte des Hühnchens im Eye*). Describe allí, entre otros elementos originantes, las tres capas germinales, a las que llamó "capa serosa", "capa mucosa" y "capa vascular".

Von Baer repitió los experimentos de Pander y refinó algunas de sus observaciones; demostró, por ejemplo, el papel estructural del notocordio. Y extendió los ensayos a otros vertebrados, fruto de lo cual sería su descubrimiento, en 1827, del óvulo de los mamíferos (*De ovi mammalium et hominis genesi*). Estableció, además, los principios teóricos de la embriología, y su relación con los planes corporales de los grandes grupos, en su obra *Uber Entwickelungsgeschichte der Thiere. Beobachtung und Reflexion* (1828-1837), partiendo de la complejidad creciente observada en la secuencia de procesos desde la fecundación hasta la eclosión en los pollos. Cumplió a Rathke cerrar el arco fundador prestando atención al desarrollo particular de órganos y sistemas, no sólo en vertebrados, sino también en equinodermos, moluscos y artrópodos, trabajos que resumió, sobre todo, en *Abhandlungen zur Bildungs-und Entwicklungs-geschichte der Menschen und der Thiere* (1832-1833).

Se dio un gran paso hacia adelante con el salto de la *Entwicklungsgeschichte*, es decir, la "historia del desarrollo", a la *Entwicklungsmechanik*, esto es, "el mecanismo del desarrollo". Jane Maienschein estudia ese período del último tercio del siglo pasado en las figuras de Wilhelm His, Eduard Pflüger, Gustav Born, Wilhelm Roux, Hans Driesch, Theodor Boveri y los americanos Edmund B. Wilson y Thomas H. Morgan. Simplificando, las nuevas ideas, subsiguientes a la teoría celular ya asentada, nacen del entorno de Roux y Driesch y se centran en la la conformación interna de las pautas emergentes y la intervención, determinante o no, de factores externos, así como en el desarrollo en mosaico del embrión.

Se buscaba, en definitiva, el principio inductor, el mecanismo en virtud del cual se producía la formación del nuevo individuo, y la razón teórica que sistematizara las múltiples nociones dispares y aisladas. Por ello, la terminología de la tercera fase de la historia de la embriología, que sigue hablando alemán, empleará expresiones tales como *Ein Beitrag zum Verständnis der tierischen Embryonalentwicklung* ("Contribución al conocimiento del desarrollo embrionario de los animales"), en el caso de Curt Herbst, abordado magistralmente por Jane M. Oppenheimer, y *Experimentelle Beiträge zu einer Theorie der Entwicklung* ("Aportaciones experimentales a la teoría del desarrollo), de Hans Spemann, historiado por Margaret Saha. Herbst atribuye a la composición iónica del medio un papel decisivo en la dirección que tomará la ontogénesis. Spemann introduce el centro organizador, la región que condiciona la evolución de los campos embrionarios. En su carta autobiográfica, Johannes Holtfreter recuerda los experimentos que le alejaron de Spemann y su propia búsqueda de la constitución química del inductor.

La inquisición del organizador volvería a reunir dos disciplinas que se habían ido distanciando desde comienzos de siglo, la genética y la embriología. Fue ése el empeño, por un lado, de Richard B. Goldschmit (la embriología se subsume en la genética) y de Ernest E. Just (la genética constituye un apartado de la embriología), y, por otro, de Salome Gluecksohn-Schoenheimer, Conrad Hal Waddington y Boris Ephrussi, para quienes ambas disciplinas se complementan y forman una nueva: la genética del desarrollo. Nacía ésta de la necesidad de abordar un objeto nuevo de estudio, los mamíferos (antes se había trabajado con anfibios sobre todo, que permitían transplantes e injertos para averiguar el destino último de los somites), de un nuevo enfoque, el estudio de fenotipos producidos por mutaciones que posibilitaban retrotraerse a las causas embriológicas, y, por último, de un nuevo profesional, el experto en genes transmitidos (herencia) que sigue el curso de su expresión (desarrollo).

Llegamos así a *Embryos, Genes, and Evolution*, reimpresión de un clásico publicado en 1983, con el añadido de una introducción que recoge los avances registrados en genética del desarrollo a lo largo de los últimos diez años. Un clásico que reivindicaba a otro clásico injustamente postergado, *The Material*

Basis of Evolution, de Goldschmidt, a quien va dedicada la obra.

Embryos... acertó en sistematizar los infinitos cabos sueltos de la embriología, la paleontología, la genética, la biología molecular y la teoría de la evolución. Ahormó datos de esas fuentes dispares en la explicación de los mecanismos de genética del desarrollo que originan los cambios evolutivos operados en la morfología. Los autores se propusieron razonar la existencia de un programa genético que gobierna la ontogenia y defender que las decisiones críticas de las fases del desarrollo corresponden a un puñado restringido de genes, reguladores, que cumplen la misión de conmutadores entre estados o vías alternativas. En línea con ello, los cambios experimentados en la morfología durante el curso de la evolución obedecerían a leyes mecánicas, a modificaciones de los sistemas genéticos de conmutación.

La tesis se sostiene sobre cuatro puntales, o secciones de tres capítulos cada una. La primera concierne a la paleobiología, y es un repaso a las cuestiones teóricas relativas al *modo* y *tempo* de la evolución, así como a la falta de simetría entre la evolución morfológica y la molecular. Principios generales éstos, sumados a los de sistemática y morfología general, que se ejemplifican en la organización de los embriones, con atención a la relación espacial de las regiones y heterocronía de los procesos.

Los capítulos de la genética del desarrollo propiamente dicha recurren a las técnicas de clonación génica y alta resolución de ADN y ARN para demostrar el control ejercido por los reguladores sobre la formación de patrones. La parte final, de síntesis, lucubra sobre la adaptación y concluye con una reflexión sobre la innovación, centrada en el caso de la adquisición de las glándulas mamarias.

Desde esa situación en 1983, la biología del desarrollo, reconocen Raff y Kaufman, ha progresado sobre todo en dos campos, en el de la heterocronía (cambios evolutivos en la temporización relativa de los episodios de desarrollo) y en el conocimiento de los genes implicados. Objeto del primero es *Heterochrony*; los hitos del segundo los repasa uno de sus protagonistas, Peter Lawrence, en *The Making of a Fly*.

El término heterocronía lo acuñó, igual que otros que hicieron fortuna ("ecología", "ontogenia" y "filogenia"), Ernst Haeckel. La comparación de las ontogenias en lo concerniente a tamaño y forma, tema estudiado en *Heterochrony* por McKinney y McNamara, trajo un derroche verbalista que obscureció muchas veces el significado real de lo que se estaba tratando: progenosis, pedogenosis, cenogenosis, variación de los adultos, neotenia, hipermorfosis, peramorfosis, desviación, demora, reducción, aceleración y alguna que otra construcción disparatada, como predesplazamiento y posdesplazamiento. (Un fino historiador de la ciencia advertiría en seguida que la nueva hornada de biólogos desconocía por entero las lenguas clásicas, cuyo dominio por sus antecesores posibilitó, entre otras cosas, la precisión en el significado.) Ese batiburrillo de palabras se proponía designar la temporización de los procesos de maduración de determinados órganos, sobre todo los sexuales, y su relación con la evolución. Pedomorfosis, por ejemplo, indica la persistencia de rasgos juveniles ancestrales en un adulto de una especie derivada; el vocablo peramorfosis remite al desarrollo de rasgos más allá de donde se había quedado la forma adulta del antepasado.

La heterocronía causa la mayoría de las alteraciones que se presentan en el desarrollo y es determinante último de las innovaciones morfológicas decisivas; en razón de lo primero se produce la variabilidad necesaria para la intervención de la selección natural, con resultado de nuevas razas o especies incluso; se explica lo segundo en cuanto consideramos que los cambios heterocrónicos experimentados en poblaciones celulares circunscritas de las primeras fases de la ontogenia originan cambios sustanciales en las interacciones entre células.

Las modificaciones de las que aquí se habla conciernen sobre todo a la forma y al tamaño corporales, y suelen agruparse en las relativas al desarrollo propiamente dicho, como las observadas en los cruces de mejora animal, y las referentes a la diferenciación celular en virtud de la cual se orientan los pasos hacia la especialización histológica. Importa conocer sus bases bioquímicas, y en ello insiste el estudio de los múltiples factores de desarrollo, amén de sus fundamentos genéticos, objeto del libro de Lawrence.

La especiación, o creación de nuevas especies, que la heterocronía fomenta encuentra su razón de ser, y su freno, en la plasticidad del sistema. No todas las formas orgánicas son posibles desde una estructura dada. El devenir, a lo largo de la evolución, está canalizado o condicionado por lo que ya se es. Lo que no significa que la aparición de nuevas morfologías sea isotrópica o lineal: la fuerza del medio puede privilegiar una tendencia en detrimento de otra, y, con ello, primar o crear incluso una tendencia evolutiva.

La biología del desarrollo se ocupa de identificar los genes que subyacen a la aparición de formas, los morfogenes, una extensa variedad de las cuales se caracterizan por permanecer, estructural y funcionalmente, en filogenias muy dispares. *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre, ha sido, y sigue siendo, el banco de pruebas ideal de esa disciplina, hasta el punto de que hoy sus territorios embrionarios, delimitados por segmentos discretos y nítidos, decoran los laboratorios como los mapas administrativos las escuelas de antaño. Peter Lawrence ha reconstruido en *The Making of a Fly* los pasos de sus cartógrafos, españoles en sobresaliente medida.

Según la escala, podemos tener una perspectiva general donde resalte la formación del blastodermo, la gastrulación y la segmentación. Las primeras células de *Drosophila* constituyen un sincitio, es decir, los núcleos poseen porciones —islotes— del común citoplasma. En las divisiones nucleares, unas células se rezagan para funciones auxiliares, no originarias de embrión propiamente dicho, y otros migran hacia un extremo, las células polares, que inician la síntesis proteica, y configuran una monocapa celular, el blastodermo. Sufre éste paulatinas transformaciones, que desembocan en un plan fundamental del embrión, diseñado en una lámina celular de dos dimensiones.

Otra etapa decisiva en el desarrollo de todos los animales es la gastrulación, en virtud de la cual un grupo ventral de células de la blástula se arrollan entre sí para crear un embrión de doble capa, las dos primeras hojas germinales. Ocurre por entonces también la distribución en parasegmentos, cuyo desarrollo en segmentos propiamente dichos se da en la fase siguiente llamada lógicamente de segmentación, por la que se diferencian las regiones de la boca, el tórax y el abdomen.

Si afinamos el pie de rey, seguiremos esos procesos a través de los genes responsables, identificados a través de técnicas de mutación inducida, clonación y marcaje químico. Y aquí es donde entra la aportación española, numerosa y de primer rango, nacida en el entorno de Antonio García-Bellido. (L. A.)

Apuntes

Soplan vientos de esperanza para el tratamiento de enfermedades graves. Se están buscando en el cerebro humano neuronas capaces de regenerarse para remediar así el mal de Alzheimer, el de Huntington y el de Parkinson. Laboran ahí los mismos investigadores que descubrieron las neuronas regenerativas del cerebro de ratón. Algo parecido ocurre con las células sensoriales del oído interno, cuya regeneración podría curar la sordera permanente, regeneración que se ha conseguido ya en aves, peces y ratones.

Los géyseres son buenos detectores de los terremotos, pues experimentan cambios persistentes cuando "sienten" la inminencia de un seísmo importante. Eso es lo que indican las estadísticas del geyser de Galistoga, en California septentrional, y el Old Faithful del parque de Yellowstone. Las modificaciones aludidas se refieren a los niveles de agua del pozo, magnitudes hidrotérmicas y otras.

La repetición del experimento, o de la observación, es consustancial con la ciencia, ya sea para corroborar un fenómeno o un proceso, ya sea para desmentirlo. Veamos un ejemplo de observación astronómica. Hace once años, el satélite Einstein descubría estrellas jóvenes en el cúmulo de las Hyades que brillaban, en la gama de los rayos X, cincuenta veces más que el Sol. De ello se infirió, con fundamento, que poseían una actividad cromosférica y magnética mayor que el astro. El reciente rastreo del satélite ROSAT, más fino, ha encontrado que algunas de tales estrellas de brillo similar entonces discrepan ahora y ha habido una que ha desaparecido. No parecen desarrollar mayor actividad que el Sol, aunque sí son más variables.

Veamos otro ejemplo de experimentación. Tres años atrás, se probó que la hidrólisis del ATP por parte de la actina durante su polimerización debíase a las propiedades elásticas del filamento ATP-actina, que diferían de las del ADP-actina, almacenando esta segunda molécula energía para emplearla en procesos ulteriores. Se ha visto ahora que tal interpretación puede ser pura ficción, si atendemos a la inestabilidad del ADP-actina: basta con tratar la proteína con cuidado para que desaparezcan las diferencias de elasticidad y viscosidad de los dos tipos de filamento. Lo que acontece, se justifica, es que la conversión del ATP-actina en ADP-actina posibilita la rápida despolimerización de los filamentos, una vez que la célula ya no los necesita.

La estrella enana AU del Microscopio produce, a imagen del Sol, fulguraciones ocasionales. Las observaciones espectroscópicas de un episodio de esos ha puesto de manifiesto un incremento de brillo en el rojo de la línea de emisión Lyman-alfa del hidrógeno. El fenómeno se ajusta al mecanismo propuesto para explicar las fulguraciones: un haz de protones energéticos viaja a lo largo de un bucle del campo magnético que se prolonga desde la estrella. En su recorrido, interactuaría con hidrógeno neutro, intercambiando electrones y produciendo la emisión Lyman-alfa con un pequeño corrimiento Doppler.

Uno de los campos más activos de la biología celular en los últimos años ha sido el relacionado con la mitosis. La situación, esquematizada, viene a ser la siguiente: la división de la célula en dos células hijas genéticamente idénticas depende de la replicación y segregación precisas de los cromosomas. La fidelidad de esos procesos depende, a su vez, de la solución del problema de la terminación, es decir, de la necesidad de asegurar que han concluido ciertos episodios del ciclo celular antes que se inicien otros. Esa certeza se controla por mecanismos de retroalimentación que detectan los fallos en la replicación o reparación del ADN y la constitución del huso. Si fracasan los mecanismos de control, se abre la esportilla al cáncer.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PUENTES PREFABRICADOS, por Jean Müller
La prefabricación de los componentes acelera la construcción de esa obra pública. Los mayores, doblemente atirantados, podrían salvar vanos de 3000 metros.

PENSAMIENTO Y MENTE EN MONOS, por Robert M. Seyfarth y Dorothy L. Cheney
¿Son los sonidos de los monos reflejo de un pensamiento? Los diferentes gritos de alarma transmiten información semántica específica.

CAJAL Y LA ESTRUCTURA HISTOLOGICA DEL SISTEMA NERVIOSO, por José M. López Piñero
La mitificación de Cajal ha conducido a una imagen tópica, basada en varios supuestos que falsean gravemente la realidad.

LO QUE VIO COLON EN 1492, por I. Bernard Cohen
Cuando Cristóbal Colón llegó al Nuevo Mundo, su formación y sensibilidad determinaron las impresiones que recibió y la interpretación de cuanto observó.

LA VOZ HUMANA, por Robert T. Sataloff
Pese a la fascinación que las voces privilegiadas han ejercido desde siempre, continúa envuelta en el misterio la naturaleza de la vocalización humana. A lo largo de los últimos veinte años la colaboración interdisciplinaria y los avances tecnológicos han aclarado el origen y cambio de los sonidos vocales.

EVOLUCION MOLECULAR DIRIGIDA, por Gerald F. Joyce
Cuando un horticultor quiere una rosa más viva elige los individuos que portan ese carácter y selecciona su descendencia con esmero. De manera análoga, las técnicas para ampliar, mutar y seleccionar las macromoléculas más prometedoras permiten a los bioquímicos imitar la naturaleza y dirigir la evolución de nuevos fármacos y catalizadores.

ANTIPROTONES EXTREMADAMENTE FRIOS, por Gerald Gabrielse
El enfriamiento y consiguiente captura de estas partículas, a energías bajísimas, da pie para esperar la generación de los primeros átomos de antimateria.

¿POR QUE ENVEJECEMOS?, Ricki L. Rusting
Los investigadores están logrando sólidos progresos en el estudio de uno de los grandes misterios de la vida. Creando en el laboratorio organismos longevos, han sacado a la luz los mecanismos que determinan el desgaste y la muerte, así como los genes que controlan dichos procesos.

